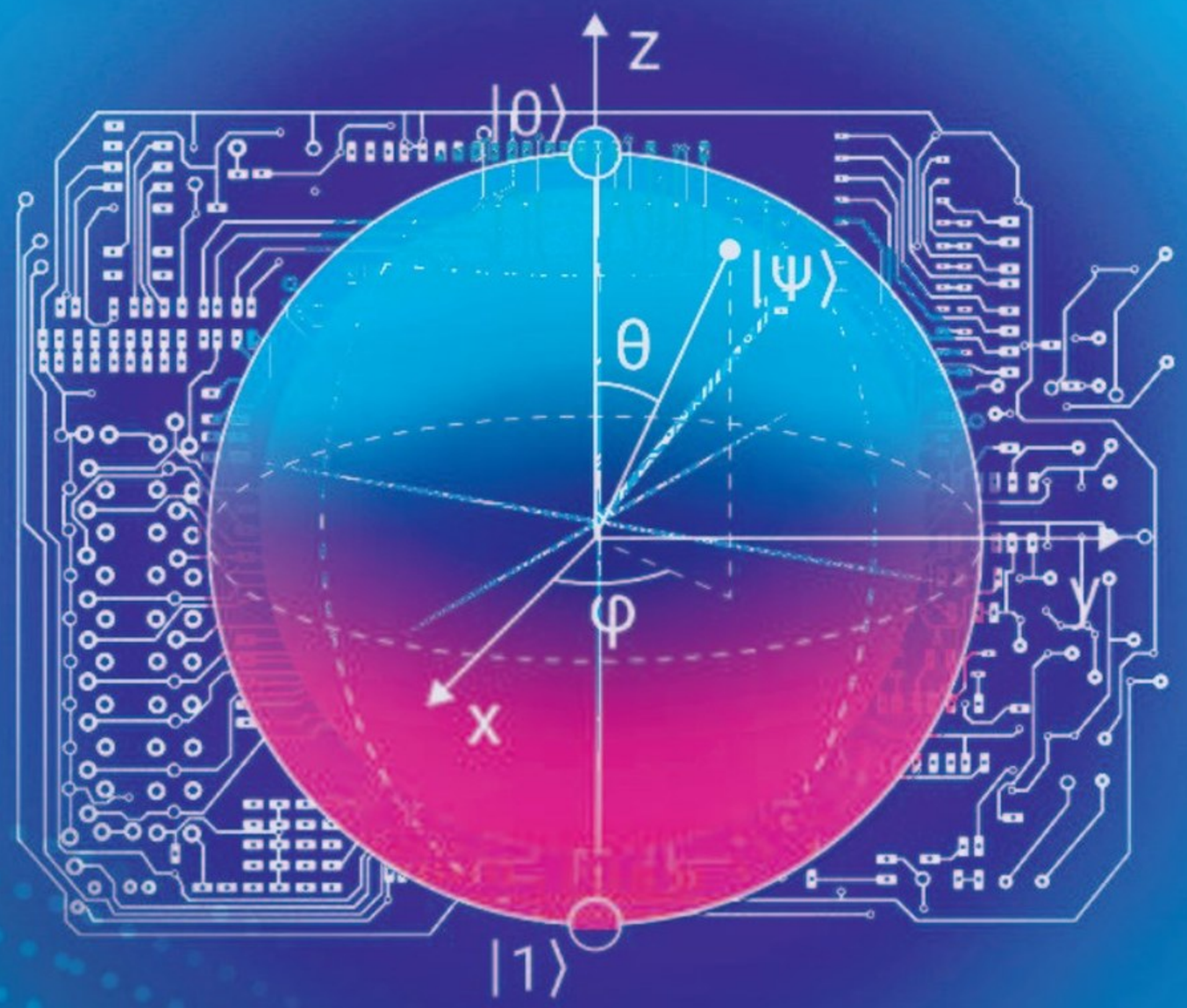
SCIENCES ET AVENIR

©SHUTTERSTOC et KULYK/SPL/SUCRÉ SALÉ
NELEA33/SHUTTERSTOCK - JOEL SAGET/AFP

Entretien exclusif avec
Alain Aspect
Prix Nobel
de physique
p.40

L'ORDINATEUR QUANTIQUE ARRIVE !

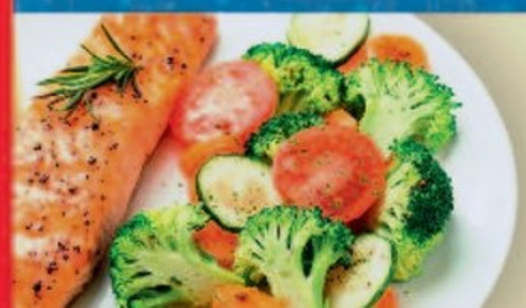
p.26



SCIENCES ET AVENIR - N° 932 - OCTOBRE 2024 - L'ORDINATEUR QUANTIQUE ARRIVE !

OCTOBRE 2024 - N° 932 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 €
/ DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 932 H - F: 5,30 € - RD



PLASTIQUES Alerte dans nos assiettes

p.66

Explorez l'Antarctique.
Un monde sauvage au-delà de l'horizon

© YURI CHOUFOUR/KARSTEN BIDSTRUP

RÉSERVEZ TÔT ET ÉCONOMISEZ JUSQU'À 20% + MEILLEUR PRIX GARANTI

À PARTIR DE :

7 447€

TTC/pers

Succombez à la beauté de l'Antarctique aux eaux cristallines et icebergs impressionnants. Laissez-vous surprendre par les baleines et observez les manchots et les phoques dans leur habitat naturel, guidé par notre équipe d'expédition.

Réservations :
Tél : 01 86 26 04 19
travelhx.com/fr ou dans votre agence de voyages

HURTIGRUTEN EXPEDITIONS

Changez votre regard sur le monde.

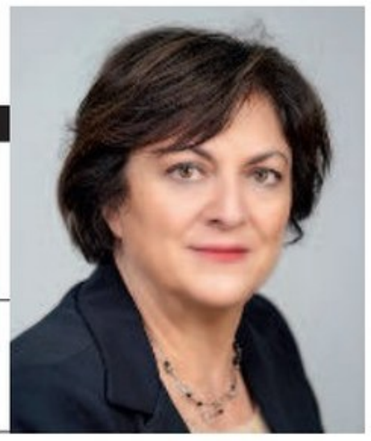
*Offre soumise à conditions, sous réserve de disponibilités, non rétroactive, valable sur nos croisières d'expédition pour des départs entre le 01.04.2025 et le 31.03.2026, sur la part maritime uniquement, pour toute nouvelle réservation faite jusqu'au 11.11.2024. Le montant de la remise varie en fonction de la destination, de l'itinéraire, du navire et de la date de départ. Meilleur prix garanti : si le prix du voyage, à l'identique, baisse après la réservation, nous ajusterons le solde du voyage. Prix à partir de, en cabine double, pour la croisière « Merveilles de l'Antarctique » des 30.10.2025 ou 09.03.2026. Cette offre est cumulable uniquement avec la remise 1893 Ambassador. Hurtigruten France SAS au capital de 40 000€ - R.C.S Paris B 449 035 005 – IM 075100037 – APST RCAPST HISCOX / 125 520.

Scannez le QR Code pour en savoir plus

UNE SOCIÉTÉ HURTIGRUTEN GROUP

ÉDITORIAL

Dominique Leglu
Directrice éditoriale



BERNARD MARTINEZ

Vie et mort des glaciers

Il va falloir changer la définition du dictionnaire. Pour *Le Robert*, un glacier est un *« champ de glace éternelle qui s'écoule très lentement »*. Avec les cris d'alarme lancés à nouveau cet été depuis Reykjavik, les termes d'*« éternel »* et de *« lentement »* semblent devenus plus qu'inadéquats. Tout simplement faux. En Islande, qui peut craindre que son nom de terre glacée tienne du souvenir, était en effet dévoilée le 17 août la première « Liste mondiale des glaciers-victimes ». Avec l'inauguration d'un « Cimetière des glaciers » où des stèles de glace gravées portaient le nom des chers disparus, car fondus.

Le nom et l'histoire. Heureusement qu'il y a des anthropologues pour rappeler que les humains ont besoin de rituels, surtout lors de funérailles. La démarche de Cymene Howe et Dominic Boyer de l'université Rice à Houston (États-Unis) a ceci de louable que leur « Global glacier casual list » peut être consultée sur Internet, la sensibilité en plus. Non seulement sont nommés 15 grands glaciers trépassés ou en imminent danger de mort, mais leur histoire nous est contée et leur lieu de vie indiqué sur un globe interactif, de la Tanzanie à la Nouvelle-Zélande en passant par le Népal, la Norvège ou les États-Unis.

Accélération de la fonte. Vie et mort de votre glacier, voilà qui touche au cœur plus que les statistiques, pourtant rabâchées. On se souvient du One Planet – One Polar Summit d'où, le 10 novembre 2023, avait été lancé l'Appel de Paris pour les glaciers et les Pôles. Constat ? Avec le réchauffement climatique, *« le recul quasi irréversible de quelque 200 000 glaciers, situés en Afrique, dans les Amériques, en Antarctique, en Asie, en Europe et en Océanie »*. Avec accélération de la fonte. Prévision ? *« Au moins la moitié de ces glaciers pourraient disparaître d'ici à 2100. »*

Blanc-brun. Les deux anthropologues, eux, parlent de cimetière. Rappellent l'importance vitale que ces glaces ont eue pour les humains alentour. Sur leur culture, sans oublier l'économie. Ce ne sont pas les habitants de nos Alpes ou Pyrénées qui diront le contraire. Dans cette rubrique nécrologie très spéciale, se retrouve d'ailleurs un français : le glacier de Sarenne en Isère, célébré par cinq auteurs, outre les liens renvoyant à plusieurs articles (Inrae, France Bleu, Reporterre…), qui s'étaient émus de sa perte en 2023.

Risque de submersion. L'« avant-après » de Sarenne peut être retrouvé en image interactive sur le site français « Glacioclim ». Immense langue blanche, sur photo noir et blanc début XX^e^ siècle, montagne brune parsemée de quelques névés en 2016. Fonte massive. Avec un genre de conséquence dont on soulignera aussi l'importance à l'instar de l'appel de Paris : la hausse accrue du niveau de l'océan. D'où le danger de submersion pour des centaines de millions d'humains vivant sur le littoral. Cette question aura été au cœur du festival Grand Océan à Cherbourg les 13 et 14 septembre, coorganisé par *Sciences et Avenir* avec *Challenges* et *L'Histoire*. Notre prochain numéro en donnera les moments saillants. ■

COURRIER

« La France à + 4 °C, ce qui va changer »
(*Sciences et Avenir–La Recherche* n° 928, juin 2024)

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

J'ai été très intéressé par votre dossier sur le changement climatique. Mais est-il vraiment important de faire des prévisions catastrophiques alors que le climat a toujours changé et que les hausses de la température ont été bénéfiques comme l'attestent l'optimum climatique du Moyen Âge ainsi que l'optimum romain ?

Richard Boulanger

S. et A. : Il y a toujours eu des variations climatiques en effet, mais celle-ci est unique par son intensité et sa rapidité. Gagner 1,5 °C en deux siècles, ça ne s'est jamais vu. Si des hausses (et des baisses) de la température ont été dans le passé bien plus importantes, si la planète a connu des périodes de température globale bien plus élevées que celles d'aujourd'hui, ces variations se sont déroulées progressivement sur des milliers d'années, pas sur quelques décennies.

Dodo naturalisé ?

Je viens de lire l'article intitulé « Dans les coulisses de la reconstitution du dodo » (*S. et A.* n° 928) et j'ai été très surpris par le passage : « *Aucun spécimen naturalisé ne nous est parvenu.* » Alors je me demande quelle était la nature de ceux que j'ai vus et photographiés au Natural History Museum de Londres. En effet, deux spécimens apparemment naturalisés sont présentés au milieu des collections.

Alain Lafforgue

S. et A. : Les dodos exposés dans les différents musées d'Histoire naturelle ne sont pas des spécimens naturalisés, notamment en raison de la disparition de l'espèce avant la naissance même de la discipline. Tout le travail des scientifiques et taxidermistes est de recréer un modèle au plus près de la réalité. Les dodos qui viennent de faire leur entrée dans la salle des espèces menacées et disparues de la Grande Galerie de l'évolution, à Paris, s'inscrivent donc dans cette volonté de faire évoluer la représentation des dodos en s'appuyant sur les nouvelles connaissances.

Forces contraires

Je suis abonné depuis longtemps à votre magazine et je vous remercie pour la qualité de vos articles et j'attends toujours impatiemment le prochain numéro de *Sciences et Avenir*. J'ai donc lu dans un de vos articles (« La première seconde de l'Univers », *S. et A.* n° 927, mai 2024) que l'expansion de l'Univers, initiée par le Big Bang et qui se poursuit probablement selon des forces contraires à la gravitation universelle provoquées par l'énergie noire, se fait dans toutes les directions et l'image choisie était le gonflement d'un ballon. Aussi dans cette hypothèse, où se situe l'attraction des galaxies regroupées au sein de Laniakea ?

Jean-Marc François

S. et A. : Certes, l'Univers est globalement en expansion sous l'effet de l'énergie noire, mais cela n'empêche pas que, localement, la gravitation l'emporte largement sur l'énergie noire. C'est pour cela que la Voie lactée ne se disloque pas, par exemple. Et à des échelles bien plus grandes, comme les amas de galaxies, ou les amas d'amas comme Laniakea, l'action « locale » de la gravitation l'emporte sur l'énergie noire et l'expansion de l'Univers.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz
En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR
france culture
L'esprit d'ouverture

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Technologies stratégiques

« *La nature n'est pas classique, bon sang, et si vous voulez faire une simulation de la nature, vous feriez mieux de la rendre quantique, et c'est un problème merveilleux, parce qu'il ne semble pas si facile à résoudre.* » C'est avec cette phrase savoureuse, prononcée par l'un des plus grands physiciens de la seconde moitié du XXe siècle, Richard Feynman, que débute l'histoire de l'informatique quantique. Nous étions en 1981, et l'Américain donnait une conférence lors d'un colloque consacré à la simulation de la physique par les ordinateurs. Hasard de l'histoire, c'est cette même année que fut présenté par IBM le premier PC. Deux chapitres allaient s'écrire en même temps. La révolution de l'informatique grand public et, dans les laboratoires, la révolution quantique. Un peu plus de quarante ans après, les ordinateurs personnels tiennent dans la poche du pantalon et leur homologue quantique arrive enfin. Ne nous méprenons pas : inutile de courir chez votre revendeur favori pour en commander un, il reste pour le moment un outil expérimental. Mais terriblement excitant tant son impact sur nos sociétés pourrait être important. « *Tous les pays veulent être sûrs d'avoir chez eux les experts des nouvelles technologies quantiques car ils pensent — à tort ou à raison, l'avenir le dira — que ces technologies sont stratégiques* », explique Alain Aspect, prix Nobel 2022 pour ses travaux sur la physique quantique *(p. 40)*.

> “L'ordinateur quantique reste pour le moment un outil expérimental, mais terriblement excitant tant son impact sur nos sociétés pourrait être important”

Et le moteur de la recherche aujourd'hui, ajoute-t-il, ce sont les start-up. En ayant levé plus de 350 millions d'euros, les françaises sont le premier acteur européen et le troisième au niveau mondial derrière les États-Unis et le Canada. En cette fin 2024, notre pays se distingue aussi avec une innovation sans précédent dans le domaine non moins stratégique des énergies renouvelables : une centrale électrique totalement inédite s'apprête à démarrer, quelques semaines après l'allumage tant attendu du réacteur de l'EPR2. Elle consiste à produire de l'énergie à partir de la rencontre de l'eau salée avec l'eau douce dans le delta du Rhône *(p. 60)*. De quoi potentiellement alimenter toute l'agglomération marseillaise. Bonne lecture ! ■

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32 Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52 Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31 Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59 - Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28 Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33 Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI-GAVAGE, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, C. CUBRIS, O. DAILLET, L. DUTHOIT, E-O. ELJAOUHARI, N. GUTIERREZ C., K. NIKITINE, M. PARRA
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32 Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre « bienvenue aux abonnés », un encart « Sophia Boutique - Montre Planet Noire » et « Courrier International » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

VOTRE SMARTPHONE PEUT FAIRE FUIR LES MOUSTIQUES.

MAINTENANT VOUS POUVEZ
SOIT LE RÉPÉTER
À VOS ENFANTS
SOIT LE VÉRIFIER :

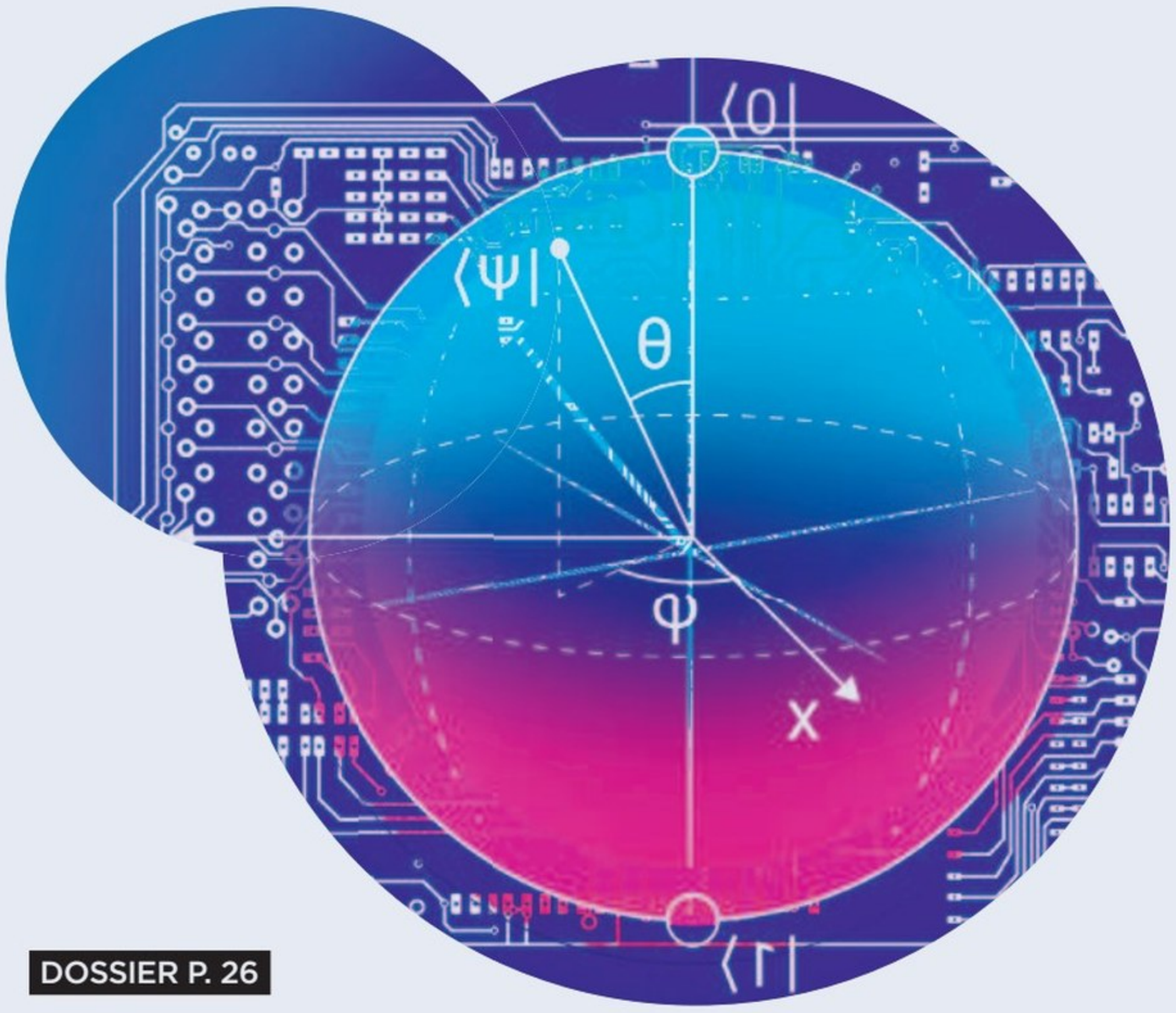
Inserm CanalDÉTOX

QUAND LA SCIENCE DÉFAIT LES FAKE NEWS* SANTÉ

*Fausses informations

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 932 / Octobre 2024



DOSSIER P. 26

L'ordinateur quantique arrive !

Des start-up françaises, comme Quandela ou Pasqal, sont à la pointe dans le développement des premiers ordinateurs quantiques. Des machines expérimentales qui préfigurent les calculateurs ultraperformants de demain.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

4 **Courrier**

5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** Une sonde part à l'assaut d'un monde océan / Le mystérieux signal « Wow ! » enfin élucidé

42 **La face cachée de la Lune sort de l'ombre**

48 **La voiture autonome ralentit mais ne cale pas**

52 **Journal de l'IA :** Quand ChatGPT se prend pour un détective privé

NATURE

12 **ACTUALITÉS** Les roses n'ont pas d'épines mais des aiguillons / Du bois de construction génétiquement modifié

54 **L'impact inattendu de la chasse sur le gibier**

60 **Une énergie renouvelable inédite voit le jour en France**

64 **Une anomalie froide trouble l'Atlantique**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** Le moustique se guide aussi aux infrarouges / Un robot dentiste spécialisé dans la pose de couronnes

66 **Alerte aux microplastiques dans nos aliments**

74 **Variole du singe : la crainte d'une nouvelle épidémie**

78 **Nutrition :** Comment réduire sa consommation de sel

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Des inédits d'Euripide exhumés en Égypte / Les dinosaures voyageaient entre l'Afrique et l'Amérique

80 **Madagascar : un exceptionnel repaire de pirates se dévoile**

86 **Histoire des sciences :** Rosalind Franklin, une pionnière de l'ADN

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni-Gavage / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Le ciel d'octobre**

98 **Jeux**

P. 54

L'impact inattendu de la chasse sur le gibier

Les chasseurs altèrent le patrimoine génétique du gibier qu'ils ciblent, avancent des chercheurs, avec à l'appui des exemples d'évolution contrariée chez les cervidés ou les éléphants.

P. 66

Alerte aux microplastiques dans nos aliments

L'eau que nous buvons et les aliments que nous ingérons sont pollués par des particules de plastique. Les chercheurs ont mis en évidence des effets toxiques sur la santé. Enquête.

P. 80

À Madagascar, un incroyable repaire de pirates

L'île Sainte-Marie a été le campement de forbans aux XVII^e^ et XVIII^e^ siècles. Les archéologues mettent peu à peu au jour d'innombrables vestiges témoignant de leurs activités.

M. KULYK/ SPL / SUCRÉ SALÉ - SHUTTERSTOCK - SWIRLY MAGNOLIA / ALAMY/ PHOTO12 - FRED MARVAUX/REA - GIANCARLO COSTA / BRIDGEMAN IMAGES

NASA

Une sonde part à l'assaut d'un monde océan

La mission Europa Clipper de la Nasa rejoindra en 2030 Europe, un des satellites de Jupiter, afin d'évaluer l'habitabilité du réservoir d'eau liquide sous sa croûte glacée.

Le 10 octobre, la sonde Europa Clipper devrait décoller du Centre spatial Kennedy en Floride (États-Unis) pour rejoindre Europe, un des nombreux satellites de Jupiter, qui abrite un gigantesque réservoir d'eau liquide sous sa croûte glacée. Et répondre, enfin, à une série de questions qui obsèdent les exobiologistes depuis plus de quatre décennies. Que contient exactement cet océan souterrain? Pourrait-il permettre l'émergence et le développement d'une forme de vie? Face à de tels enjeux — l'une des meilleures chances d'identifier une activité biologique dans le Système solaire —, l'agence spatiale américaine a développé une mission hors norme: mesurant 30,5 mètres de longueur lorsque ses panneaux solaires sont déployés (soit davantage qu'un terrain de basket), Europa Clipper est en effet le plus grand vaisseau spatial jamais conçu par la Nasa pour une mission planétaire. Il faudra encore s'armer de patience toutefois, car cette sonde de six tonnes qui aura coûté au total près de cinq milliards de dollars — l'une des plus chères de l'histoire de la Nasa — n'arrivera qu'en 2030 aux abords du système jovien. Tout commence en 1979 lorsque les sondes Voyager réalisent les premiers survols d'Europe, à 750 millions de kilomètres du Soleil (cinq fois la distance Terre-Soleil). Les images qu'elles transmettent dévoilent un extraordinaire réseau de stries et de failles bordées de dépôts de couleur foncée, comme si des plaques de glace se déplaçaient sur un milieu visqueux voire liquide, à l'instar d'une banquise. *« C'est à ce moment-là que l'hypothèse d'un océan souterrain enveloppant la totalité de l'astre a été pour la première fois évoquée »*, rappelle Gabriel Tobie,

du Laboratoire de planétologie et géosciences à Nantes Université. Elle sera confirmée une vingtaine d'années plus tard par la mission Galileo. Celle-ci montre, tout d'abord, que les zones sombres sont très riches en sels, suggérant des processus de remontées d'eau salée et d'évaporation au niveau des zébrures. Mais son magnétomètre trahit surtout l'existence d'une vaste couche électriquement conductrice sous la glace, s'expliquant là encore par un océan dont la concentration en sels équivaudrait à ceux de notre planète… Entre 2012 et 2016, le télescope Hubble fournit de nouvelles preuves : il observe plusieurs panaches de vapeur d'eau, de 200 km de hauteur, émanant vraisemblablement de la surface d'Europe.

Une chimie microbienne pourrait exister

Mais ce qui rend cet océan si fascinant pour l'exobiologie est qu'il serait en contact direct, comme sur Terre, avec un sol rocheux. Cette interface permettrait des échanges d'énergie et de chaleur avec l'intérieur de l'astre, essentiels pour maintenir l'eau à l'état liquide, tout en solubilisant dans celle-ci une variété de substances minérales. Des remontées de lave pourraient même affleurer à certains endroits. « *Et engendrer ainsi les mêmes types de cheminées hydrothermales qui, sur notre planète au niveau des dorsales océaniques, sont des oasis de vie* », souligne Gabriel Tobie. Une chimie complexe, prébiotique et peut-être même microbienne, pourrait ainsi théoriquement prospérer dans ce monde aquatique, même en l'absence de lumière solaire !

Europa Clipper, première mission dédiée exclusivement à l'étude d'Europe, qui effectuera une cinquantaine de survols à des distances comprises entre 25 km et 2700 km, n'a certes pas été conçue pour détecter les traces d'une activité biologique. Mais ses neuf instruments (spectromètres, magnétomètre, radar de subsurface, analyseur de poussières, etc.) fourniront des informations capitales sur les caractéristiques de l'océan. Ils permettront, en particulier, de déterminer à quelle distance il se trouve sous la surface (de 10 à 30 km selon les estimations) ainsi que sa profondeur (sans doute plus de 100 km, à comparer avec les 3,8 km de profondeur moyenne des océans terrestres), mais aussi les types et concentrations de sels et de molécules organiques tout comme l'existence de cheminées hydrothermales. « *On pourra ainsi savoir, au terme de cette mission, si l'océan d'Europe constitue un milieu habitable et peut potentiellement abriter la vie* », s'émerveille Gabriel Tobie.

En identifiant les régions où la couche de glace est la plus fine et active, et arbore les plus grandes richesses moléculaires, Europa Clipper ouvrira aussi la voie aux prochaines missions. « *Dans le futur, des atterrisseurs pourraient en effet s'y poser pour analyser très finement les éléments qui s'y trouvent et débusquer d'éventuelles biosignatures* », présage le chercheur nantais. ■ **F. D.**

La plus grande carotte dévoile les entrailles de la Terre

GÉOLOGIE La plus longue section de manteau terrestre récupérée l'an dernier grâce à un carottage record de 1268 mètres sous 800 mètres d'eau a fait l'objet d'une description préliminaire dans la revue *Science*. Si les analyses vont sans doute durer, elle révèle déjà des contradictions avec les modèles courants sur la formation de la croûte océanique et promet ainsi d'affiner notre compréhension du magmatisme et des phénomènes volcaniques. **F. D.**

SOURCE : JOHANN LISSENBERG, UNIVERSITÉ DE CARDIFF, ROYAUME-UNI.

ERICK BRAVO, IODP JRSO

30 tonnes de roches ont été prélevées du manteau terrestre lors d'un carottage effectué au milieu de l'Atlantique Nord.

IL A DIT

« Imaginez une montre ne perdant pas une seule seconde, même sur des milliards d'années »

Jun Ye, physicien à l'université du Colorado à Boulder (États-Unis), donnant une idée du niveau de précision qu'atteindrait une horloge nucléaire, concept pour lequel son équipe vient de faire une percée fondamentale.

UCHICAGO / P. ALLEN; SECOND BAY STUDIOS

Représentation de protocellules il y a 3,8 milliards d'années.

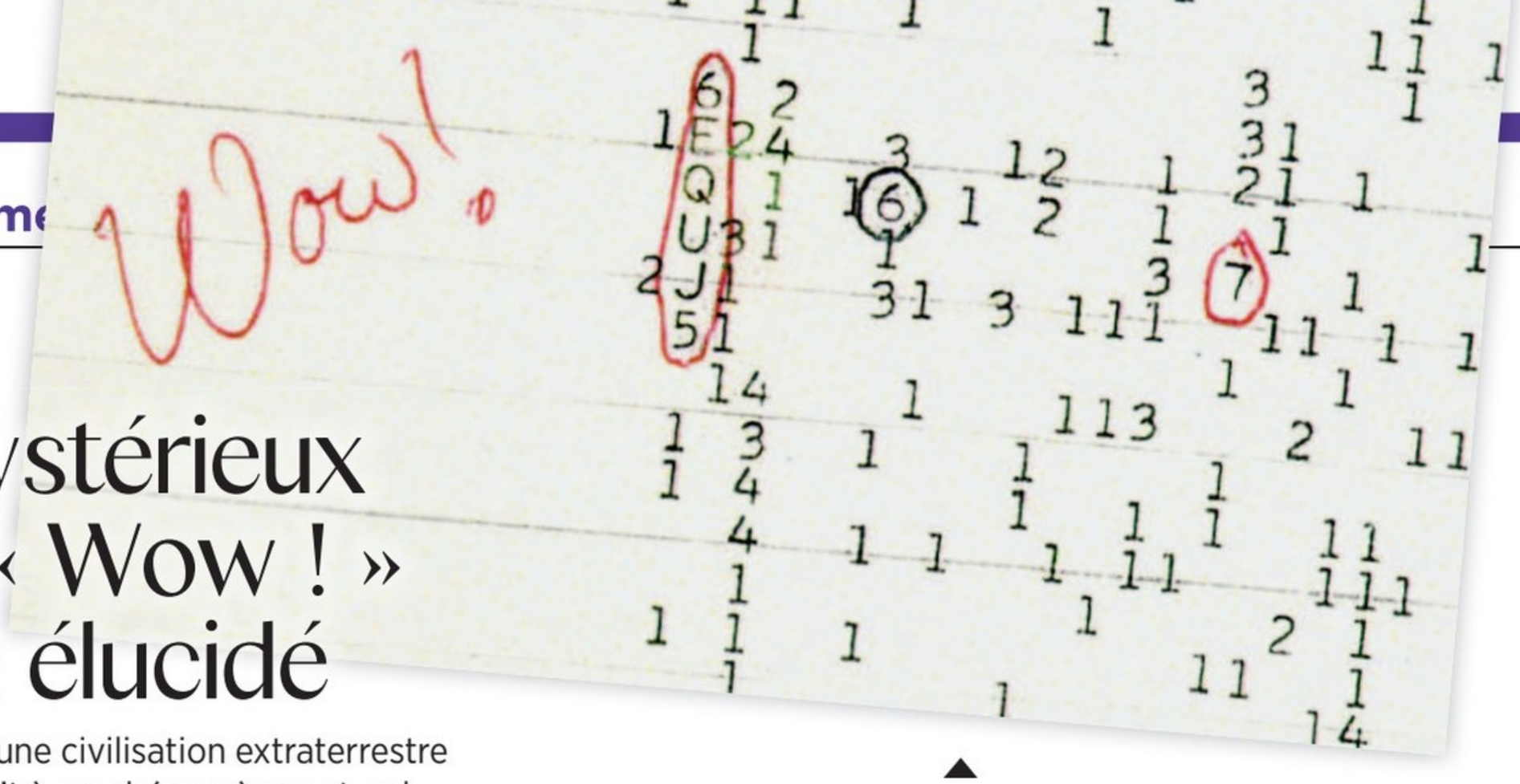
De l'eau de pluie à l'origine de la vie

BIOCHIMIE Des expériences en laboratoire suggèrent que l'eau de pluie a contribué à la formation des premières parois protocellulaires ayant permis d'encapsuler des brins d'ARN qui flottaient dans une soupe primordiale il y a 3,8 milliards d'années sur Terre. Une étape cruciale pour que ce matériel génétique brut forme les premières cellules capables d'évoluer. **H. J.**

SOURCE : AMAN AGRAWAL, UNIVERSITÉ DE CHICAGO, ÉTATS-UNIS.

Le mystérieux signal « Wow ! » enfin élucidé

Il ne provenait pas d'une civilisation extraterrestre mais correspondrait à un phénomène naturel observé pour la première fois.



Intrigué par l'intensité du signal radio, Jerry Ehman entoura son code en rouge et écrivit la célèbre interjection qui donna son nom au signal.

BIG EAR RADIO OBSERVATORY - NAAPO

En 1977, le radiotélescope de l'université de l'Ohio (États-Unis) enregistrait un étrange signal radio d'une puissance et d'une durée exceptionnelles. En le découvrant dans les données, l'astronome Jerry Ehman avait écrit « *Wow!* » dans la marge. En effet, sa fréquence correspondait à celle de l'hydrogène neutre, théorisée comme étant celle qu'utiliserait une civilisation extraterrestre pour entrer en communication. Las, le signal n'a jamais été répliqué. Cependant, après avoir passé au crible les données enregistrées de 2017 à 2020 par le radiotélescope d'Arecibo à Porto Rico, des chercheurs ont détecté des émissions similaires, « *facilement identifiables comme étant dues à des nuages interstellaires d'hydrogène froid dans la galaxie* », expliquent-ils. Selon eux, le signal « Wow ! » serait en fait le résultat d'un exceptionnel alignement cosmique : un nuage d'hydrogène aurait été brièvement éclairé par le faisceau d'une source radio puissante en arrière-plan, produisant un effet de type laser en ondes radio, un maser. **S. R.**

EN DEUX MOTS

ÉDUCATION Embellie pour la France qui enregistre une nouvelle progression de ses universités au classement de Shanghai, Paris-Saclay se hissant pour la première fois à la 12e place. **MARS** Une grande partie de l'eau qui recouvrait jadis la planète Rouge serait toujours séquestrée à quelques kilomètres de profondeur, soutient une équipe américaine. **SÉCURITÉ** Le risque de mourir en avion a été divisé par deux chaque décennie depuis la fin des années 1960, selon une étude du Massachusetts Institute of Technology.

Un robot plus fort que des débutants au ping-pong

ROBOTIQUE Un bras articulé doté d'une raquette s'est mesuré à des joueurs humains. L'algorithme de la machine a été entraîné par une phase d'apprentissage par renforcement, dans un univers simulé reproduisant 17 500 trajectoires de balles ayant réellement eu lieu. En cours de jeu, le robot suit son adversaire grâce à des caméras de capture de mouvement. Résultat : 13 victoires sur 29. Il a battu tous les débutants, mais pas (encore) les professionnels. **A. D.**

SOURCE : DAVID B. D'AMBRISIO, GOOGLE DEEPMIND, ÉTATS-UNIS.

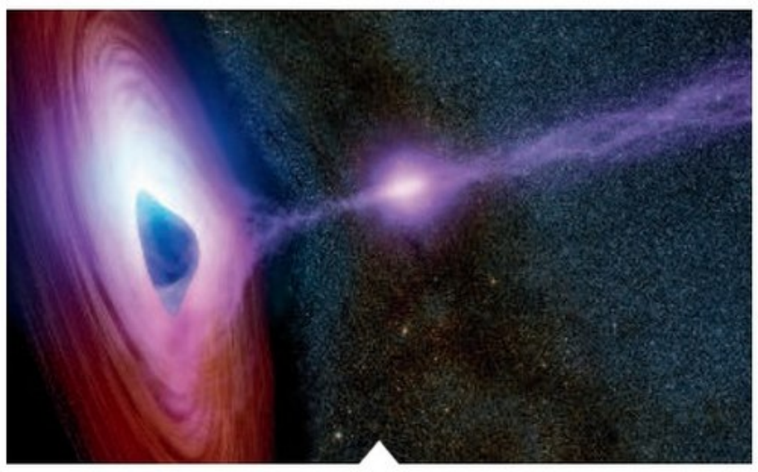
D'AMBROSIO ET AL.

Le bras articulé (ici lors d'un match d'entraînement) est monté sur deux portiques lui permettant de se déplacer en 2D.

Un algorithme contre la « fake science »

INFORMATIQUE **Pour débusquer les faux articles scientifiques rédigés par une IA, des chercheurs ont développé un algorithme qui repère l'utilisation abusive de « bigrammes », des associations types de deux mots tels « changement climatique », « santé mentale », etc. L'outil baptisé xFakeSci a réussi à repérer 80 à 94 % des faux articles.** **A. D.**

SOURCE : XINDONG WU, UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE HEFEI, CHINE.



SPL/ SUCRÉ SALÉ

L'objet bloquerait l'accès aux gaz intergalactiques.

Les trous noirs supermassifs asphyxient leurs galaxies

ASTROPHYSIQUE La plupart des galaxies abritent en leur cœur un trou noir supermassif. En étudiant 69 d'entre elles, des chercheurs ont montré que l'astre bride leur croissance par un phénomène d'asphyxie. Le trou noir bloquerait l'entrée de matière, essentiellement de l'hydrogène, en provenance de l'espace intergalactique. Privées de gaz, les galaxies ne pourraient plus former de nouvelles étoiles. **F. N.**

SOURCE : TAO WANG, UNIVERSITÉ DE NANKIN, CHINE.

Un repas cosmique gargantuesque

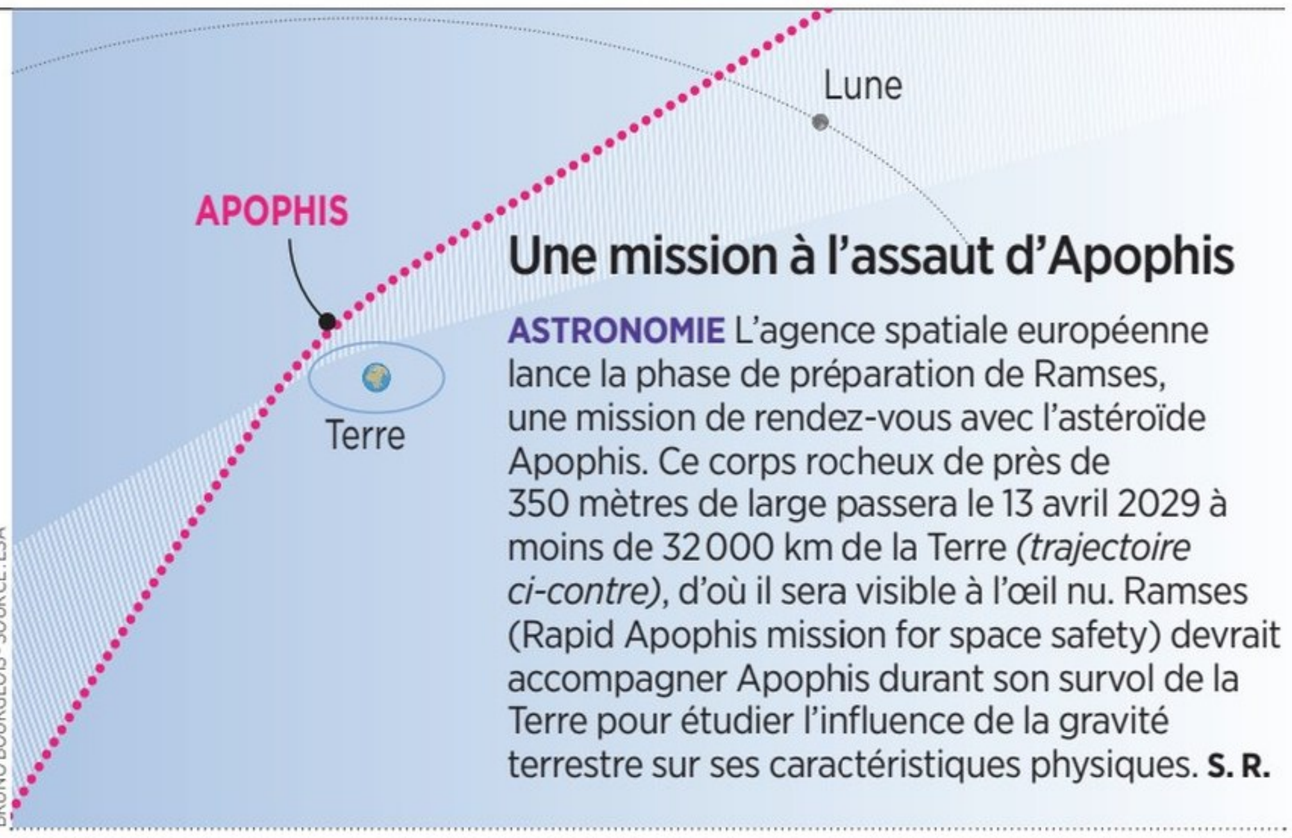
ASTROPHYSIQUE Des astronomes ont observé la destruction d'une étoile massive, 9 fois la masse du Soleil, par un trou noir de 10 millions de masses solaires. La catastrophe cosmique a libéré tellement d'énergie qu'ils ont d'abord songé à une supernova, l'explosion d'une étoile en fin de vie. Une étoile de ce type a une durée de vie courte, quelques millions d'années, ce qui indique que des étoiles peuvent se former à proximité de tels monstres. **F. N.**

SOURCE : HARSH KUMAR, UNIVERSITÉ HARVARD, ÉTATS-UNIS.

337

Le nombre record de « taches solaires »

ASTRONOMIE L'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) a recensé pour la seule journée du 8 août 337 zones de forte énergie magnétique à la surface de notre étoile. Un record depuis mars 2001 ! Ce chiffre, très élevé, indique que le Soleil a peut-être franchi ou serait tout proche de son pic d'activité. Et que le cycle solaire actuel est beaucoup plus intense que ce que prévoyaient les astrophysiciens. **F. D.**



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : ESA

Une mission à l'assaut d'Apophis

ASTRONOMIE L'agence spatiale européenne lance la phase de préparation de Ramses, une mission de rendez-vous avec l'astéroïde Apophis. Ce corps rocheux de près de 350 mètres de large passera le 13 avril 2029 à moins de 32 000 km de la Terre *(trajectoire ci-contre)*, d'où il sera visible à l'œil nu. Ramses (Rapid Apophis mission for space safety) devrait accompagner Apophis durant son survol de la Terre pour étudier l'influence de la gravité terrestre sur ses caractéristiques physiques. **S. R.**

Des escadrons de drones anti-incendie en test

L'objectif est de pouvoir lutter contre les incendies grâce à des essaims de 30 drones guidés par IA.

BBC

Les avions autonomes transportent jusqu'à 100 kg de retardant sur une distance de 1000 km.

Un consortium de pompiers, de scientifiques et d'ingénieurs britanniques a réalisé une première démonstration de deux drones œuvrant ensemble pour détecter et éteindre un feu de poubelle. Leur objectif est de pouvoir, à terme, lutter contre les incendies grâce à des essaims de 30 drones guidés par intelligence artificielle (IA). Développés par la société Windracers, les avions autonomes de 9,5 m d'envergure ont déjà été testés pour le transport de colis postaux, ainsi que des fournitures médicales. Ils peuvent transporter sur une distance de 1000 km jusqu'à 100 kg de retardant, ce produit chimique rouge freinant la propagation des incendies. Des chercheurs de l'université de Bristol travaillent maintenant à les faire voler en groupe coordonné, afin de couvrir de larges régions. Les drones bimoteurs sont dirigés chacun par une IA, ce qui permet d'ajouter ou d'ôter des robots sans perturber leur cohésion. Les chercheurs prévoient également de réaliser un test de vol en essaim pour des missions d'étude en Antarctique. **S. R.**

Les séismes façonnent les pépites d'or géantes

GÉOLOGIE Les contraintes mécaniques s'exerçant lors de séismes conduiraient les cristaux de quartz à produire une tension électrique précipitant vers eux les nanoparticules d'or présentes dans les fluides en provenance du noyau de la planète. C'est l'hypothèse formulée par une équipe de géologues pour expliquer que les plus grosses pépites d'or du monde se trouvent en effet dans des veines souterraines de quartz, une roche chimiquement inerte. **S. R.**

SOURCE : CHRISTOPHER VOISEY, UNIVERSITÉ MONASH, AUSTRALIE.

ALAMY/PHOTO12.COM

La plus grosse pépite d'or, découverte dans une veine de quartz en Australie en 1869, pèse 72 kg.

Les roses n'ont pas d'épines mais des aiguillons

Des chercheurs ont identifié le gène responsable de la formation de ces excroissances de l'épiderme commun aux rosiers, aux aubergines ou aux tomates.

MICHEL GUNTHER / BIOSPHOTO

Ne dites plus que les roses ont des épines. Elles ont des aiguillons. Cette précision est apportée par un consortium international qui vient de dévoiler dans *Science* le gène à l'origine de ces excroissances hirsutes de l'épiderme des plantes. *« Il existe en effet deux systèmes physiques de défense,* rappelle Mohammed Bendahmane, directeur de r echerche à l'Institut national de recherche pour l'agriculture (Inrae) et coauteur de cette étude. *Les aiguillons sont des excroissances de l'épiderme et peuvent donc être enlevés facilement, tandis que les épines sont des feuilles ou des tiges modifiées pour prendre cette apparence.* » Ainsi, outre les aubergines et les tomates, les rosiers sont dotés d'aiguillons, et non pas d'épines qui sont l'apanage des citronniers, de l'aubépine ou encore des ajoncs.

L'équipe a cherché à localiser plus précisément l'emplacement du gène responsable de la formation des aiguillons dans le génome de l'aubergine et du rosier. Ils ont pour cela comparé les génomes d'aubergines hybrides, domestiquées et sélectionnées pour ne plus posséder d'aiguillons, avec le génome d'aubergines sauvages qui ont gardé leurs défenses. Par recombinaison des biomarqueurs, ils ont pu ainsi restreindre la zone du génome où se trouve le responsable de la formation de la défense, un gène baptisé LOG (pour « Lonely Guy ») dont on connaissait l'existence, mais pas le rôle dans le développement des aiguillons. Les études génétiques menées sur les rosiers ont permis de confirmer la localisation.

Les parties piquantes éliminées par l'humain

Ces recherches pourraient déboucher sur des découvertes intéressant l'agriculture. L'une des caractéristiques de la domestication des plantes, c'est justement la perte de leurs défenses. L'humain n'a que faire de ces parties piquantes et les a systématiquement éliminées par sélection. *« Mais on ne connaît rien des conséquences de la perte de LOG et il est possible que l'on mette en péril des espèces d'intérêt agronomique »*, déplore le chercheur lyonnais. ■ **L. C.**

Les feux de forêt progressent vers le nord

MÉTÉO FRANCE

Les nouveaux territoires à risque d'incendies (en vert) s'étendront au nord dès 2050.

CLIMATOLOGIE Une équipe de l'Inrae a pu déterminer plus finement la probabilité de survenue d'incendies de plus de 100 hectares à la fin du siècle en France. Dans le Sud-Est, les nouvelles régions menacées sont le Haut-Languedoc, les Causses, les Cévennes, les monts d'Ardèche, l'arrière-pays provençal. À l'ouest, les deux tiers nord des Landes et une partie de la Dordogne devront se préparer à des événements bien plus graves que ceux auxquels ils sont actuellement soumis. **L. C.**

20

Le nombre d'espèces marines découvertes

ZOOLOGIE Coraux, poissons, mollusques, éponges et crustacés… 20 nouvelles espèces de l'extrême ont été identifiées lors d'une expédition de l'Institut océanographique Schmidt dans les abysses de la dorsale de Nazca, une chaîne de montagnes sous-marines située dans l'océan Pacifique, au large du Pérou. **O. L.**

LIMICOL®
L'EFFICACITÉ PROUVÉE CONTRE LE CHOLESTÉROL

Le **premier et le seul** complément alimentaire ayant obtenu une allégation de santé exclusive par l'Union Européenne.*

BÉNÉFICE SANTÉ VALIDÉ
par les autorités européennes

PROUVÉ CLINIQUEMENT

-20%

DE LDL-CHOLESTÉROL DÈS 1 MOIS[1]

FORMULE BREVETÉE
ACTIFS NATURELS
ET VITAMINES

Levure de riz rouge

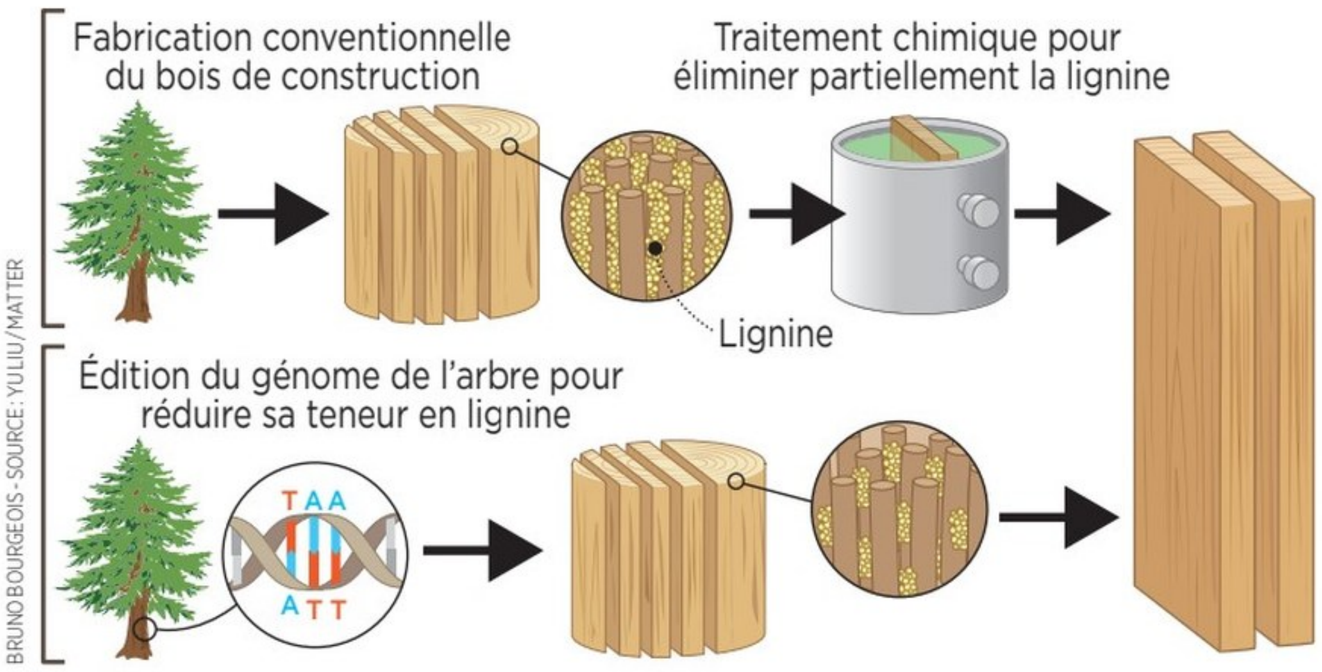
Extrait d'ail

Extrait d'artichaut

Votre accompagnement anticholestérol et une **OFFRE AVANTAGEUSE** à découvrir ici

05 46 56 30 48 | **laboratoire-lescuyer.com** | FORMULATION ET FABRICATION FRANÇAISES

Complément alimentaire à base de monacoline K issue de levure de riz rouge, extraits de plantes et vitamines. Ne doit pas être consommé par les femmes enceintes ou allaitantes, les enfants de moins de 18 ans et les adultes de plus de 70 ans. Si vous avez des problèmes de santé, demandez conseil à votre médecin avant de consommer ce produit.Ne doit pas être consommé en cas de prise de médicaments pour réduire le cholestérol ou si vous consommez déjà d'autres produits contenant de la levure de riz rouge. Ne pas dépasser la dose journalière recommandée (ne pas consommer plus de 3 mg de monacolines par jour). À tenir hors de portée des jeunes enfants. Ne se substitue pas à une alimentation variée, équilibrée et à un mode de vie sain. Plus d'informations sur **www.laboratoire-lescuyer.com**. *La combinaison d'actifs de Limicol® réduit les concentrations de cholestérol LDL dans le sang. Une cholestérolémie LDL élevée constitue un facteur de risque dans le développement des maladies coronariennes. Il existe d'autres facteurs de risque qu'il est également important de surveiller. La modification de l'un de ces facteurs peut ou non avoir un effet bénéfique. Ce produit est destiné aux personnes devant contrôler leur taux de cholestérol sanguin. 1 - Réduction moyenne observée lors de 3 études cliniques réalisées sur un total de 184 sujets âgés de 18 à 65 ans, présentant une hypercholestérolémie non traitée : Ogier et al. Eur J Nutr 2013 ; Barrat et al. Int J Food Sci Nutr. 2013 ; Barrat et al. Eur J Nutr 2013



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE: YULIU/MATTER

La nouvelle méthode (en bas) réduit la lignine sans produire de déchets.

Du bois de construction génétiquement modifié

Cette modification génétique de l'arbre permet de supprimer le traitement chimique qui diminue la lignine du bois.

Modifier le génome des arbres pour réduire l'empreinte carbone de l'ingénierie du bois, c'est la piste explorée par des chercheurs de l'université du Maryland (États-Unis). Ils ont ciblé le gène 4CL1 à l'origine de la lignine, molécule qui donne au bois sa résistance : sans lignine, il est plus souple et peut subir une plus grande déformation, des propriétés recherchées pour un matériau plus performant. Avec cette méthode, plus besoin de traitement chimique — qui génère des déchets importants. Il suffit de tremper le bois génétiquement modifié dans de l'eau sous vide pendant 24 heures, puis de le soumettre à une pression de 5 mégapascals à 120 °C pendant une heure. Ainsi, il devient aussi résistant que le bois densifié par traitement chimique. Ce type de bois de haute performance rallongerait même la séquestration du carbone. **O. D.**

17,347 MILLIONS D'HECTARES

La superficie de forêts détruites par les mégafeux au Canada en 2023

ENVIRONNEMENT En cinq mois, les mégafeux de forêt canadiens de 2023 ont détruit environ 4 % de la couverture forestière du pays. Les incendies ont produit autant d'émissions de carbone que l'Inde en un an, soit 647 millions de tonnes de carbone dans l'atmosphère, ont calculé des chercheurs. **H. J.**

SOURCE : BRENDAN BYRNE, CALTECH, ÉTATS-UNIS.

Transformer le sable en digue anti-érosion

NORTHWESTERN UNIVERSITY

Un courant électrique a cimenté le sable de ces pots.

INGÉNIERIE En s'inspirant des précipitations minérales dans l'eau de mer qui se produisent lors de la formation des coquilles de mollusques, ultrarésistantes, une équipe est parvenue à transformer, par un courant électrique, du sable marin en une roche plus solide que le béton. Une réaction chimique qui pourrait servir à créer des digues « naturelles » protégeant les côtes de l'érosion. **O. D.**

SOURCE : ANDONY LANDIVAR MACIAS, UNIVERSITÉ NORTHWESTERN, ÉTATS-UNIS.

La chaleur égare les bourdons

ENTOMOLOGIE Selon des tests menés en laboratoire, les vagues de chaleur perturbent la capacité des bourdons à sentir les fleurs, alerte une étude. Si ces insectes pollinisateurs s'intéressent à la couleur, la forme et la taille des fleurs qu'ils butinent, ils se fondent aussi sur des indices olfactifs. Lesquels deviennent difficiles à déceler au-delà de 40 °C. **A.-S. T.**

SOURCE : SABINE NOOTEN, UNIVERSITÉ DE WURTZBOURG, ALLEMAGNE.

SOTT PORTELLI

Le filet de bulles, vrai outil de pêche pour les baleines

ÉTHOLOGIE Plus qu'une simple stratégie, les spirales de bulles que les baleines à bosse soufflent en remontant vers la surface pour piéger les poissons sont utilisées comme des outils. Une étude montre que les cétacés contrôlent activement le nombre, la taille et l'espacement des bulles pour maximiser leur prise, faisant de ces bouillonnements aquatiques de véritables filets de pêche. **H. J.**

SOURCE : ANDY SZABO, ALASKA WHALE FOUNDATION, ÉTATS-UNIS.

RÊVER À NOUVEAU C'EST TOUT UN APPRENTISSAGE

Apprentis d'Auteuil aide chaque année plus de 40 000 jeunes(1) en difficulté à bâtir leur avenir.

Soutenez-nous sur www.apprentis-auteuil.org

APPRENTIS D'AUTEUIL

La confiance peut sauver l'avenir

(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2023. Agence Marcel - © Yann Le Pape

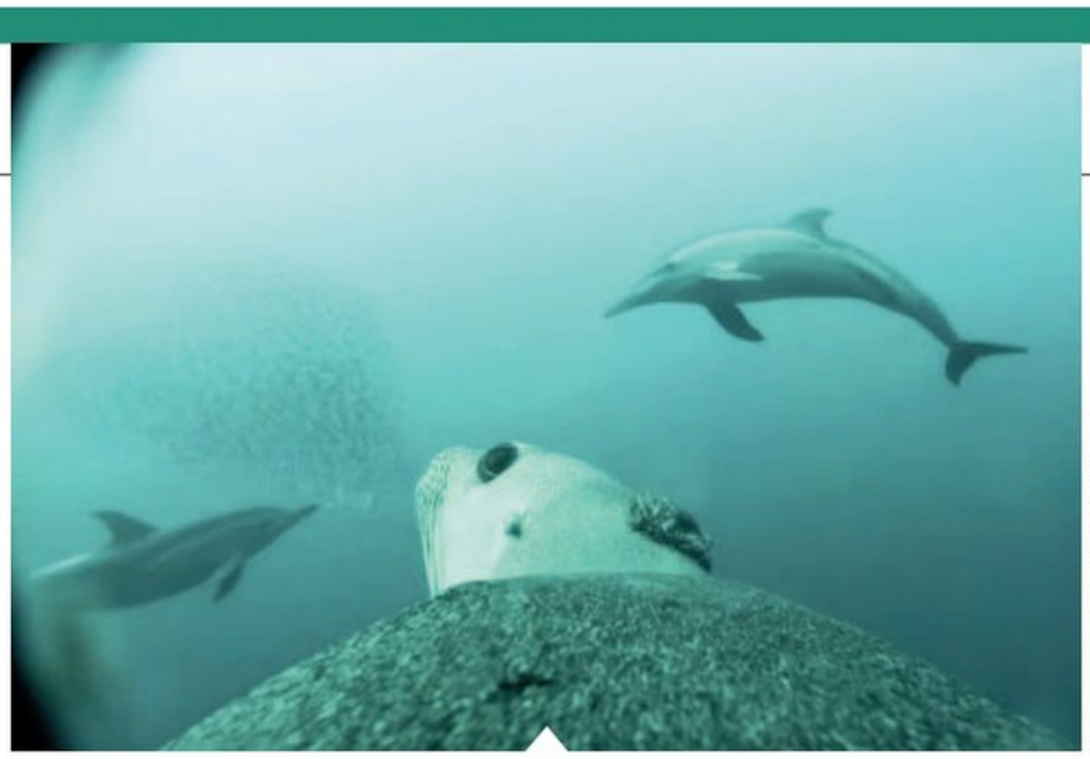
Ces araignées utilisent des lucioles comme appâts lumineux

ARACHNOLOGIE Des observations menées sur le terrain auprès de 161 toiles tissées par *Araneus ventricosus* montrent que cette araignée endémique d'Extrême-Orient sait tirer parti des signaux lumineux émis par les lucioles de l'espèce *Abscondita terminalis*. Lorsqu'elle capture un mâle, elle l'emballe et le mord de manière répétée, jusqu'à lui faire émettre des signaux imitant ceux des femelles. Elle attire ainsi d'autres mâles. Ces derniers se précipitent alors sur la toile, où ils sont dévorés. **A.-S. T.**

SOURCE : XINHUA FU, UNIVERSITÉ AGRICOLE DE HUAZHONG, CHINE.

XINHUA FU

L'arthropode enveloppe la luciole mâle jusqu'à ce qu'elle ne produise plus qu'un seul signal, typique des femelles.



SARDI/NESP MARINE AND COASTAL HUB

L'une des huit otaries (au centre) au large de la côte australienne.

Des lions de mer cartographient les fonds marins

Équipées de caméras, ils ont fourni des images inédites de zones inexplorées de la côte sud de l'Australie.

Huit lions de mer australiens (*Neophoca cinerea*) ont été recrutés par une équipe internationale d'océanographes en vue d'explorer des régions et des profondeurs océaniques difficiles d'accès. Les nombreux robots sous-marins déployés depuis des navires océanographiques ne sont en effet pas suffisants pour étudier la diversité des fonds, et sont de plus coûteux et difficiles à mettre en œuvre. Les lions de mer ont été équipés de caméras et de capteurs de vitesse et de localisation. Ils ont fourni des images inédites de forêts de varech ou de rochers couverts de corail dans des zones inexplorées des îles Kangaroo et Olive, au large de la côte sud de l'Australie. Les chercheurs ont également documenté pour la première fois l'apprentissage de la chasse par une mère à ses petits. Après quelques jours de plongée jusqu'à 90 m de fond, les capteurs ont été retirés pour analyse. Une meilleure compréhension des habitats des lions de mer australiens, classés « en danger », devrait permettre de mieux les préserver. **S. R.**

Les pesticides s'infiltrent dans la chair des pommes

ARBORICULTURE Rincer les pommes ne suffirait pas à éliminer les résidus de pesticides présents sur la peau du fruit. En effet, à l'aide d'une nouvelle méthode d'analyse, une équipe chinoise est parvenue à identifier des traces de pesticides dans la couche de pulpe la plus externe de fruits sur lesquels avaient préalablement été pulvérisés deux pesticides. Des traces ont été trouvées dans la chair des fruits, à moins d'un demi-millimètre de la peau. **M. P.**

SOURCE : ZEWAN LIN, UNIVERSITÉ AGRICOLE D'ANHUI, CHINE.

SHUTTERSTOCK

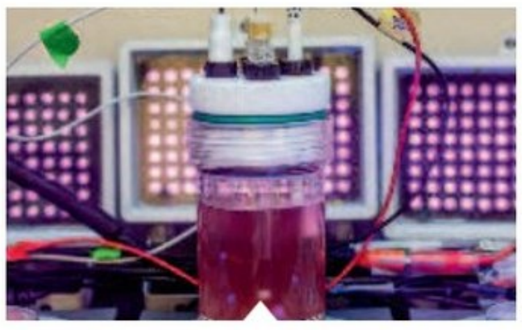
La fine couche de pulpe après la peau absorbe aussi les substances exogènes.

IL A DIT

« Dans ces milieux extrêmes, les plantes inventent de nouvelles fonctions »

Nicolas Gross, chercheur à l'Inrae et premier auteur d'une étude dans *Nature* montrant que les plantes qui réussissent à s'adapter aux marges des déserts présentent une diversité de formes, de comportements physiologiques et de compositions biochimiques qu'on ne retrouve dans aucun autre écosystème terrestre.

Des bactéries productrices de bioplastiques



J. ANGELES/WASHINGTON UNIV.

« Rhodopseudomonas palustris » est stimulée pour produire des polymères naturels.

BIO-INGÉNIERIE Produire du plastique entièrement biodégradable sans émettre de CO_2 dans l'atmosphère, c'est possible. C'est en tout cas ce qu'avancent des chercheurs qui ont exploité des bactéries de couleur pourpre de l'espèce *Rhodopseudomonas palustris* qui produisent naturellement des polyhydroxyalcanoates (PHA), des polymères naturels qui peuvent être purifiés pour fabriquer du plastique. Ils sont parvenus à stimuler cette production pour transformer les micro-organismes en mini-usines. **H. J.**

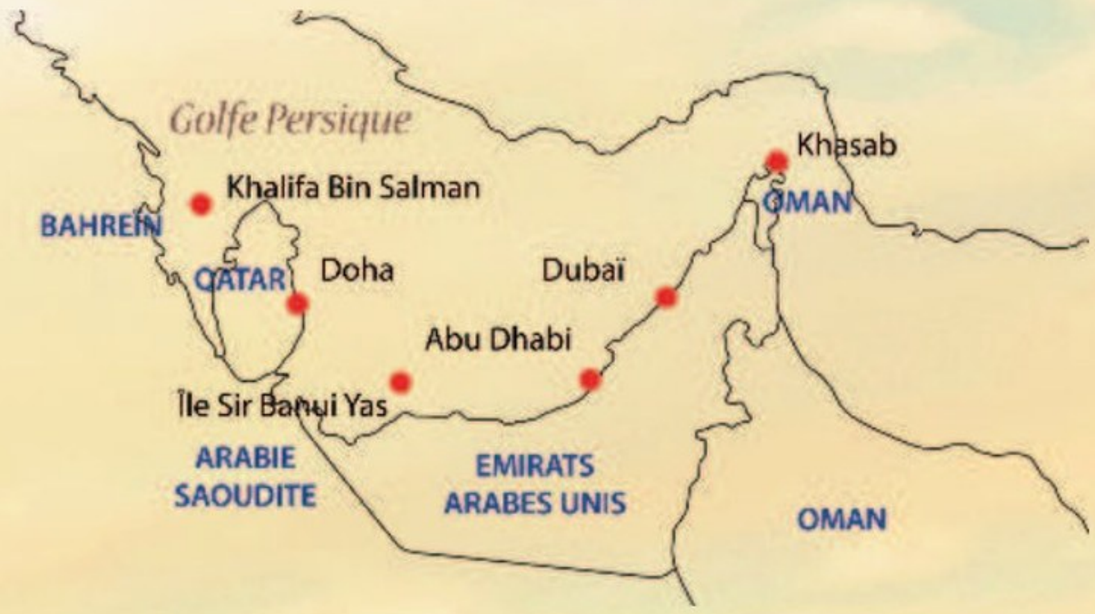
SOURCE : TAHINA ONINA RANAIVOARISOA, UNIVERSITÉ DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.

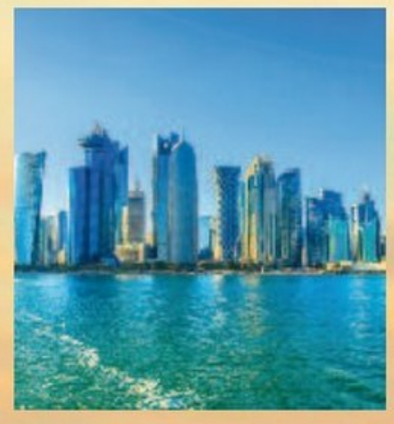
PLEIN CAP CROISIÈRES

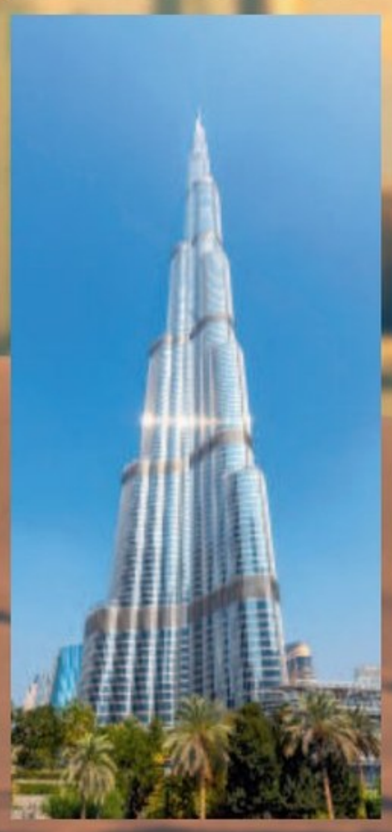
Les Trésors
DU GOLFE ARABIQUE

Qatar - Bahreïn - Emirats Arabes Unis - Oman

Du 28 février au 10 mars 2025
à bord du Celestyal Journey







À PARTIR DE
4 190 € / pers.

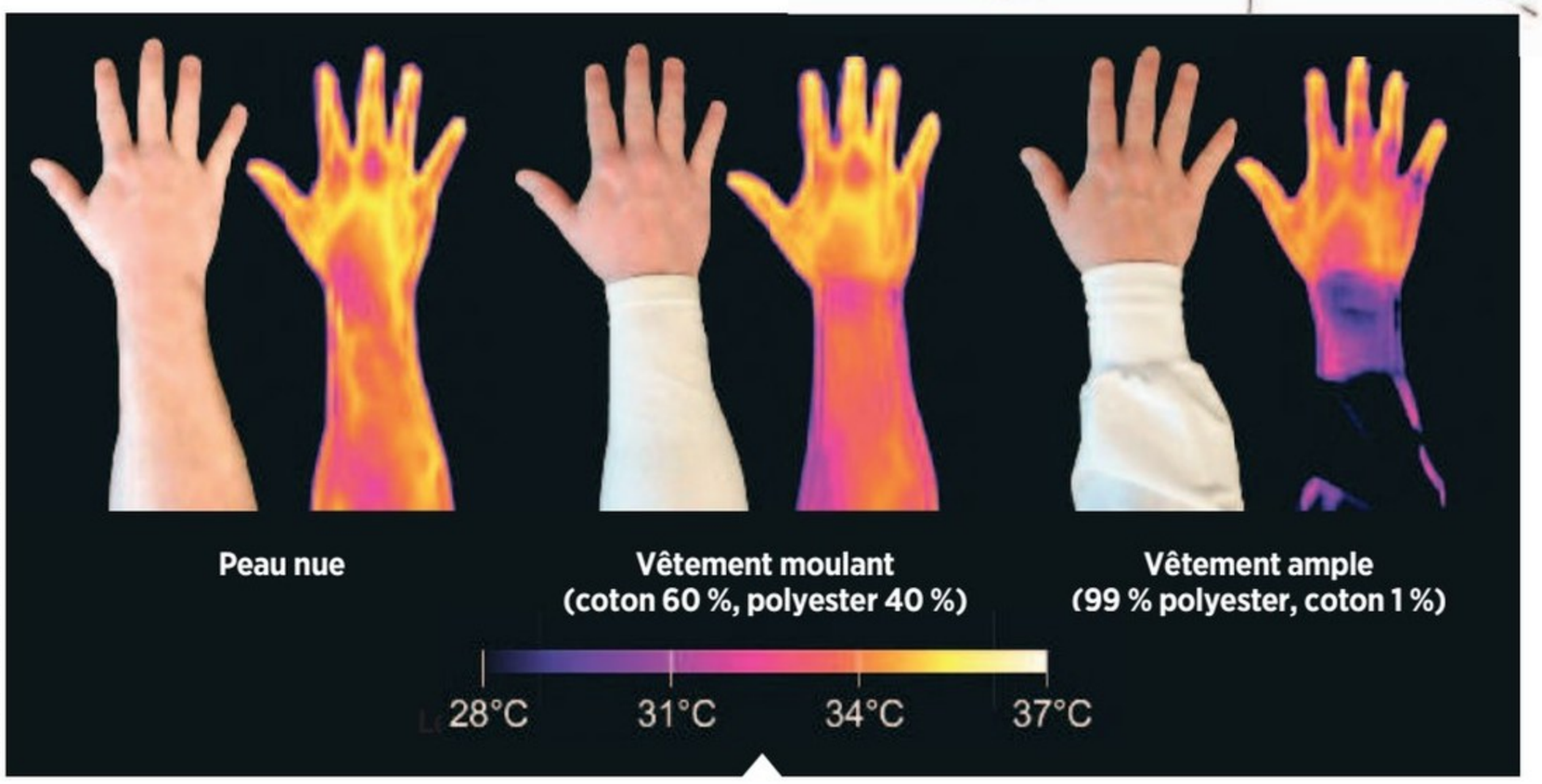
AU DÉPART DE PARIS

Retrouvez tous les détails de cette croisière sur www.plein-cap.com

Renseignements et réservations

04 93 20 21 20 ou info@plein-cap.com

Crédits photos : Celestyal / shutterstock.com/BlacksKingss/PandoraPictures/Fisher/Marty



DEBEAUBIEN AND CHANDEL ET AL. - GETTY IMAGES

Les vêtements, surtout amples et larges, dissipent une partie du rayonnement thermique émis par la peau.

Le moustique se guide aussi aux infrarouges

Ces insectes sont très sensibles à l'humidité et à la chaleur, mais aussi aux rayonnements infrarouges émis par la peau.

Dans les derniers centimètres qui le séparent de son repas de sang, ce sont les rayonnements infrarouges émis par la peau qui guident le plus sûrement le moustique jusqu'à sa cible préférée : nous. Cet ultime système de guidage vient d'être mis en évidence par une équipe de l'université de Californie (États-Unis) sur *Aedes aegypti*, le moustique-tigre. Cette sensibilité aux infrarouges vient ainsi parfaire l'arsenal du piqueur en série. D'abord, *A. aegypti* détecte dans l'air les fluctuations de dioxyde de carbone (CO_2) induites par la respiration. Cette détection opérant jusqu'à plus de dix mètres a pour effet, selon l'étude publiée dans *Nature*, d'« *élever son activité locomotrice et d'accroître sa réactivité à d'autres* stimuli ». Notamment les indices olfactifs propres à l'odeur humaine, détectables jusqu'à un à deux mètres. Mais le moustique étant doté d'une « *pauvre acuité visuelle* », il sait qu'il touche au but une fois tout proche de la peau, à moins de dix centimètres, en y détectant humidité et chaleur. C'est là que les infrarouges, émis naturellement par la chaleur du corps, entrent en jeu.

Une combinaison de CO_2, d'odeurs et d'infrarouges

Pour le montrer, les chercheurs ont placé 80 moustiques femelles dans une cage, distante de quelques centimètres de deux plaques : l'une à 29,5 °C, typique d'un pays chaud, et l'autre à température de la peau humaine : 34 °C. Cette plaque permettait l'émission d'un nuage de CO_2 et la diffusion d'une odeur de sueur humaine. En combinant ces éléments, ils ont constaté qu'un indice unique — CO_2, odeur ou rayonnement infrarouge — entraînait une réponse très faible. Elle était plus marquée avec une combinaison d'odeur et de CO_2 ; et maximale en ajoutant le rayonnement infrarouge. Cette étude explique au passage pourquoi les vêtements amples sont très efficaces pour prévenir les piqûres. Outre qu'ils rendent la peau moins accessible, ils permettent surtout de masquer les infrarouges, égarant *in extremis* le buveur de sang. ■ **L. L.**

Le microbiote des micro-ondes est extrêmophile

MICROBIOLOGIE Une équipe espagnole a passé au crible les écosystèmes bactériens qui peuplent une trentaine de fours à micro-ondes utilisés dans des cuisines de particuliers, collectives ou dans des laboratoires de recherche. L'étude montre que si les ondes électromagnétiques éliminent bien des bactéries dangereuses comme *E. coli*, les salmonelles ou la listeria, elles exercent aussi une pression de sélection en faveur d'espèces dites extrêmophiles, soit des bactéries capables de proliférer dans des conditions extrêmes. **H. J.**

SOURCE : ALBA IGLESIAS, UNIVERSITÉ DE VALENCE, ESPAGNE

SHUTTERSTOCK

Certaines bactéries résistent aux ondes électromagnétiques.

IL A DIT

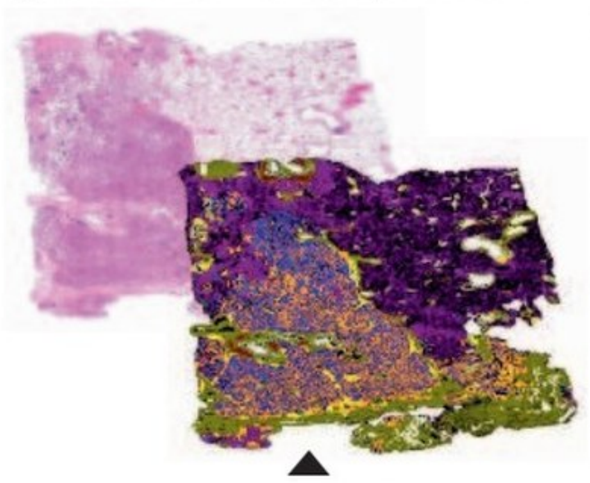
« Nos résultats montrent que la terre de Sommières permet de tuer les punaises de lit en 24 heures »

Pascal Delaunay, entomologiste médical du CHU de Nice, qui a mené une étude publiée dans la revue *Parasite* montrant que ce produit ménager vendu couramment dans le commerce est efficace contre ces insectes envahissants.

Le cancer des poumons diagnostiqué par une IA

ONCOLOGIE Pour accélérer et affiner l'analyse des tumeurs pulmonaires de ses patients, une équipe hospitalière allemande a mis au point une plateforme d'algorithmes conçus pour cartographier et caractériser le type de cellules cancéreuses à partir d'échantillons de tissus numérisés. Au lieu d'un examen au microscope, l'intelligence artificielle automatise l'analyse pour faire un bilan des caractéristiques tumorales du cancer. **H. J.**

SOURCE : CARINA KLUDT, HÔPITAL UNIVERSITAIRE DE COLOGNE, ALLEMAGNE.



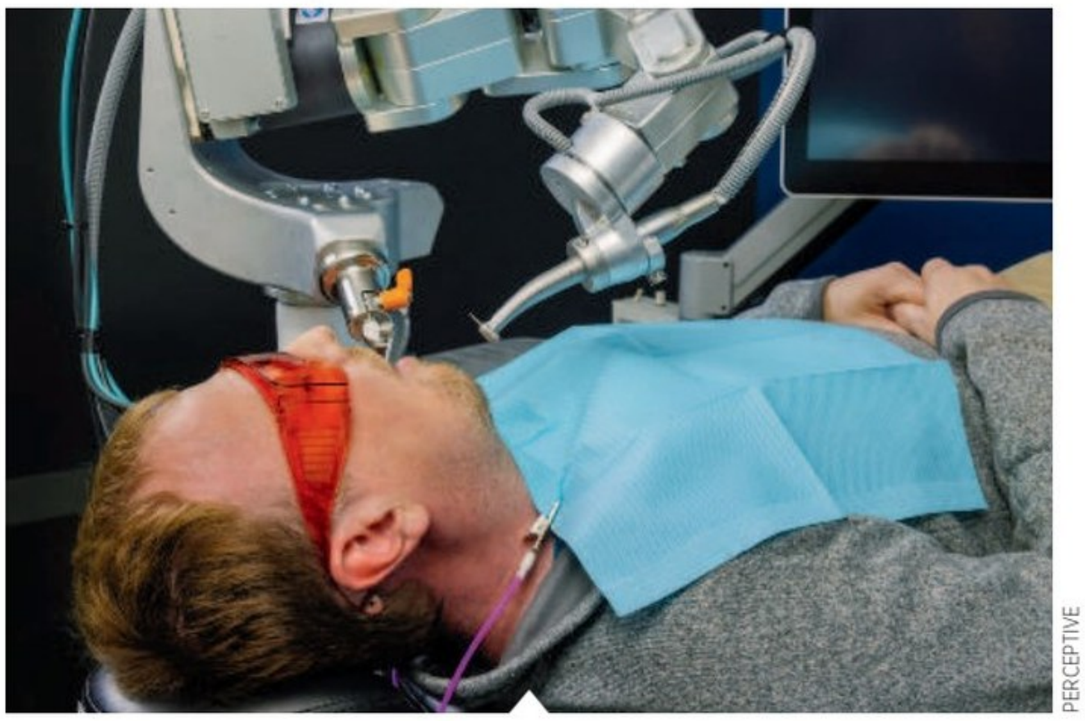
DR. YURI TOLKACH

À partir d'une biopsie classique, l'algorithme cartographie les cellules tumorales (en bleu).

Un robot dentiste spécialisé dans la pose de couronnes

La technique serait plus précise et plus stable dans le temps.

Première mondiale : un robot entièrement contrôlé par une intelligence artificielle a réalisé cet été en Colombie une intervention dentaire sur un humain, soit la pose d'une couronne. Selon l'entreprise américaine qui l'a conçu, Perceptive, cette technologie pourrait mettre huit fois moins de temps qu'un dentiste pour des interventions de ce type. Tout repose sur un scanner intra-oral qui utilise la tomographie en cohérence optique (OCT), capable de modéliser en 3D l'ensemble de la bouche du patient, c'est-à-dire la disposition des dents, des gencives et des nerfs situés à l'intérieur même de la dent, et ce sans rayons X. Outre le gain de temps mis en avant par Perceptive, la technique serait aussi à la fois plus précise et plus stable dans le temps. En revanche, le robot n'est pas encore capable d'évaluer l'état de stress de son patient. **S. R.-M.**



PERCEPTIVE

Le dispositif utilise un scanner intro-oral capable de modéliser l'ensemble de la bouche en 3D.

EN DEUX MOTS

NEUROLOGIE Les personnes atteintes de sclérose en plaques sont beaucoup moins susceptibles de développer la maladie d'Alzheimer, selon une étude de l'université de Washington (États-Unis). **POLIO** La campagne de vaccination contre la poliomyélite organisée dans la bande de Gaza en guerre a permis d'immuniser 161 000 enfants, selon l'OMS. **ONDES** Une méta-analyse menée par l'Agence australienne de radioprotection confirme que les téléphones portables ne sont pas liés aux cancers de la tête et du cerveau.

Le Brésil se dote d'un laboratoire P4

VIROLOGIE Le Brésil a célébré la pose de la première pierre de ce qui devrait être, d'ici à 2028, le premier laboratoire de biosciences de sécurité maximale d'Amérique latine. Ce laboratoire P4 est conçu pour étudier les agents pathogènes les plus dangereux au monde : virus Ebola, Marburg ou certains coronavirus… Adossé au Centre brésilien de recherche sur l'énergie et les matériaux à Campinas, Orion sera connecté à une source de lumière synchrotron permettant l'étude fine des protéines virales. **H. J.**

DISCLOSURE/CNPEM

En construction près de São Paulo, Orion devrait être opérationnel en 2028.

Un quart des personnes dans le coma sont conscientes

NEUROLOGIE Une étude menée sur 241 patients souffrant de lésions cérébrales graves et non répondants physiquement révèle qu'un sur quatre est conscient. Lorsqu'on leur demande des mouvements physiques simples, ils présentent des signes évidents de fonctions cognitives visibles par électroencéphalogramme (EEG) ou IRM. Un phénomène connu sous le nom de « conscience cachée » s'apparentant cliniquement à un syndrome d'enfermement. **H. J.**

SOURCE : YELENA BODIEN, UNIVERSITÉ HARVARD, ÉTATS-UNIS.

STANFORD UNIVERSITY

QUESTIONS À

Michael Snyder

Professeur de génétique à l'université Stanford (États-Unis)

« 44 et 60 ans sont des âges charnières »

Une étude publiée dans *Nature Aging* montre que le processus de vieillissement s'accélère à deux moments précis de la vie. Explications de celui qui a dirigé ces travaux.

Comment sait-on que le vieillissement n'est pas linéaire ?
Nous savions que ce processus n'est pas continu. Ainsi, le risque de maladies augmente avec l'âge. Maintenant, nous montrons que l'accélération ponctuelle du vieillissement est due à des changements moléculaires survenant principalement à deux moments précis de la vie.

Quels sont-ils ?
Les deux âges charnières surviennent en moyenne à 44 et 60 ans. C'est là que les changements moléculaires sont les plus significatifs. Lors de la première étape, c'est notamment des voies liées au métabolisme de l'alcool ou des lipides qui sont affectées. Alors qu'à 60 ans, c'est plutôt le métabolisme de la caféine ou les fonctions cardio-vasculaires et rénales qui sont touchées.

À quoi sont dus ces changements ?
L'un des facteurs principaux est le style de vie. Durant la quarantaine, les gens ont tendance à devenir plus sédentaires. De même à la soixantaine, au moment de la retraite. Tous les centenaires ont trois choses en commun : ils sont restés relativement actifs physiquement, mangent bien et sont bien entourés. Cela suggère que notre style de vie joue un rôle essentiel. C'est plutôt rassurant, cela veut dire que nous pouvons agir pour mieux vieillir.

Propos recueillis N. G. C.

ARS PHARMACEUTICALS

Simple à utiliser, Neffy offre une alternative non invasive aux injections intramusculaires.

Un spray nasal pour lutter contre l'anaphylaxie

ALLERGOLOGIE Révolution dans le traitement du choc anaphylactique, une réaction allergique sévère de l'organisme mettant en jeu le pronostic vital. Aux États-Unis, la Food and Drugs Administration (FDA) vient en effet d'approuver Neffy (laboratoires ARS Pharmaceuticals), la première pulvérisation nasale remplaçant le traitement classique jusque-là administré par injection. À ce jour, ce traitement n'est approuvé que pour les adultes et les enfants de plus de 30 kg. À suivre pour la France. **S. R.-M.**

Le dépistage de la drépanocytose systématisé

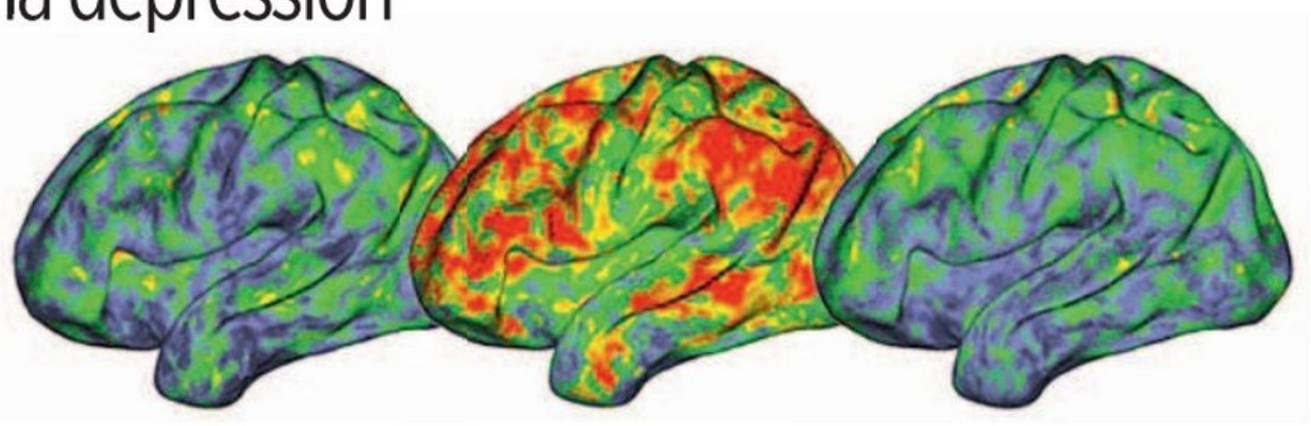
NÉONATALOGIE Déjà systématique depuis 1992 en Guyane française, le dépistage de la drépanocytose, une anomalie génétique de l'hémoglobine, va enfin se généraliser pour l'ensemble des nouveau-nés dans l'Hexagone à partir du 1er novembre. Réalisé entre 48 et 72 heures après la naissance, il permettra de détecter les cas jusqu'à présent écartés par les algorithmes de décision réalisés sur des groupes à risque mais manquant de précision. **S. R.-M.**

Un étrange risque de cancer chez les 30-60 ans

ÉPIDÉMIOLOGIE Les personnes de la génération X (nés entre 1965 et 1980) et les « millennials » (nés entre 1980 et 2000) ont un risque plus élevé de développer 17 cancers différents, comparés aux générations précédentes, révèle une étude épidémiologique menée à partir des données de 23 654 000 patients diagnostiqués avec 34 types de cancer. Un phénomène inquiétant encore inexpliqué. **C. L.**

SOURCE : HYUNA SUNG, AMERICAN CANCER SOCIETY, ÉTATS-UNIS.

La psilocybine réarrange le cerveau contre la dépression



SARA MOSER/WASHINGTON UNIVERSITY

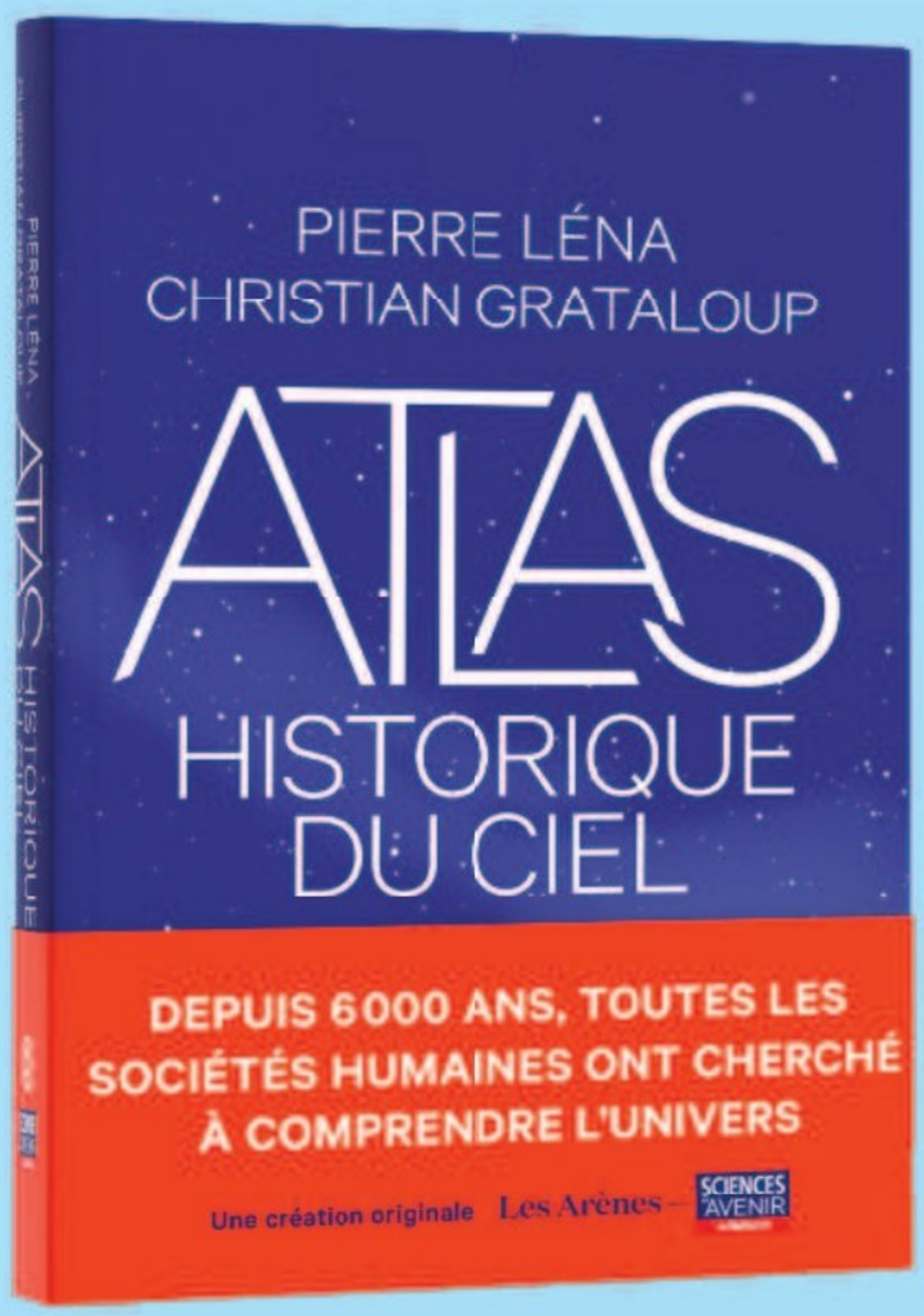
L'intense activité cérébrale déclenchée par le psychédélique (au centre) modifie durablement le schéma d'activation du cerveau au repos (avant à gauche, après à droite).

PSYCHIATRIE L'efficacité contre la dépression du principe actif des champignons hallucinogènes, la psilocybine, a peut-être été percée à jour. En examinant l'activité cérébrale de sept adultes sains avant, pendant et jusqu'à 6 mois après la prise d'une dose élevée de ce psychédélique, les chercheurs ont constaté que l'expérience avait modifié durablement le réseau du mode par défaut, ces zones actives lorsque le cerveau ne fait rien de particulier. À l'origine des pensées introspectives, la conformation de ce réseau est intimement liée à la dépression. **H. J.**

SOURCE : JOSHUA SIEGEL, UNIVERSITÉ DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.

NOUVEAUTÉ
Sortie en librairie
le 3 octobre

Un atlas qui est autant un livre d'histoire qu'un livre de science



- **300 cartes et infographies inédites.**
  En s'appuyant sur une équipe d'historiens, de scientifiques et de cartographes de premier plan, Pierre Léna et Christian Grataloup réalisent un atlas accessible à tous, à la pointe de la recherche.
- **Un outil indispensable pour tout savoir sur le ciel et l'histoire de ceux qui ont cherché à le comprendre.**

250 pages - 27 €

Les Arènes

SCIENCES AVENIR La Recherche

Des illustrations et des schémas

Des ciels «historiques»
Ici, le ciel observé par Galilée depuis Padoue en 1609.

Des cartes inédites

Des infographies
Tableaux, graphiques et infographies pour rendre plus accessibles certaines données.

BASEMGEHAD

Le papyrus sur lequel figurent les extraits de deux pièces du célèbre tragédien du Ve siècle avant notre ère.

Des inédits d'Euripide exhumés en Égypte

Une tombe du IIIe siècle livre deux tragédies perdues du dramaturge grec.

C'est un véritable événement dans le monde des hellénistes. Deux chercheurs de l'université du Colorado à Boulder (États-Unis) s'apprêtent à publier les résultats de longs mois d'investigation sur des fragments de textes inconnus du dramaturge grec Euripide, l'un des trois grands tragédiens de l'époque classique avec Eschyle et Sophocle. Il s'agirait d'extraits inédits de deux pièces lacunaires, *Polyidus* et *Ino*, écrites au Ve siècle avant J.-C. Les textes figurent sur un papyrus récemment mis au jour dans une modeste tombe de femme et d'enfant du IIIe siècle de notre ère, dans la nécropole de Philadelphie, à 85 km au sud-ouest du Caire (Égypte). Une trouvaille exceptionnelle : les tragédies grecques anciennes parvenues jusqu'à nous ne dépassant pas la trentaine. « *Nous ne pensons pas qu'il y ait eu une découverte de cette importance depuis les années 1960* », s'est enthousiasmé le professeur John Gibert, spécialiste mondial de la littérature grecque antique, qui a analysé les fragments. « *C'est incroyable ! C'est un rêve devenu réalité* », s'est de son côté confiée sa collaboratrice Yvona Trnka-Amrhein, papyrologue et professeure adjointe de lettres classiques.

19 pièces retrouvées à ce jour sur 95

Aujourd'hui, 19 tragédies d'Euripide ont été retrouvées dans leur intégralité mais elles ne représentent qu'une petite partie des œuvres écrites par l'auteur. Les spécialistes estiment que le dramaturge a signé environ 95 pièces. *Polyidus* et *Ino* font partie de ces pièces fragmentaires, aussi appelées « tragédies perdues », « *car elles n'ont pas été conservées dans la tradition des manuscrits médiévaux comme c'est le cas pour* Médée, détaille Yvona Trnka-Amrhein. *Nous connaissions leur existence seulement parce qu'il existe des listes de titres des pièces d'Euripide, des citations conservées par d'autres auteurs grecs et des résumés de l'intrigue des mythes qu'elles mettent en scène.* »

Les fouilles n'étant pas encore achevées dans la nécropole de Philadelphie, les deux experts espèrent que d'autres papyrus aussi extraordinaires seront exhumés. **M. B.**

L'astéroïde tueur de dinosaures venait de loin

GÉOCHIMIE L'astéroïde qui s'est abattu sur Terre il y a 66 millions d'années, entraînant la disparition de 60 % des espèces, venait d'une orbite située au-delà de Jupiter. C'est ce que révèle l'analyse des isotopes du ruthénium présents dans la couche de débris laissés après l'impact. Ils ont permis de déterminer que l'astéroïde est un type particulier de chondrite carbonée, se formant dans les confins du Système solaire. **F. N.**

SOURCE : MARIO FISCHER-GÖDDE, UNIVERSITÉ DE COLOGNE, ALLEMAGNE

Découverte du plus ancien des « hobbits »

ANTHROPOLOGIE Mise au jour en 2003 sur l'île de Flores en Indonésie et connue pour sa très petite taille (1,10 m), la lignée d'*Homo floresiensis* aurait évolué à partir de grands *Homo erectus* archaïques venus de Java il y a 700 000 ans. C'est ce que suggère l'analyse récente d'un fragment d'humérus de cette époque *(photo)* découvert en 2013. **R. M.**

SOURCE : YOUSUKE KAIFU, UNIVERSITÉ DE TOKYO, JAPON.

YOUSUKE KAIFU

CHERBOURG, LÀ OÙ COMMENCENT LES HISTOIRES.

TITANIC

LE REDOUTABLE

LA CITÉ DE LA MER

Création : agence ASGARD Illustration : Flore Maquin

leCotentin COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION

edeis

citedelamer.com

LA CITÉ DE LA MER CHERBOURG

Le plus vieil observatoire astronomique en Égypte

ÉGYPTOLOGIE Le ministère égyptien du Tourisme et des Antiquités a annoncé la découverte par une mission locale du *« premier et plus grand observatoire astronomique »* jamais inventorié, datant du VIe siècle avant J.-C. Le bâtiment de 850 m² fait de briques crues se trouvait dans le temple de Buto, dans le nord du pays, à une centaine de kilomètres d'Alexandrie. Il donne un aperçu des techniques sophistiquées employées pour déterminer le calendrier solaire et les dates religieuses et agricoles importantes. **M. B.**

EGYPT MINISTRY OF TOURISM AND ANTIQUITIES

Daté de 2500 ans, un des objets mis au jour dans l'observatoire.

Il y a 120 millions d'années, les deux continents étaient adossés, montre la similitude d'empreintes.

Les dinosaures voyageaient entre l'Afrique et l'Amérique

Des empreintes de pas quasi identiques ont été découvertes à 6000 km de distance : une preuve que les deux continents étaient bien reliés.

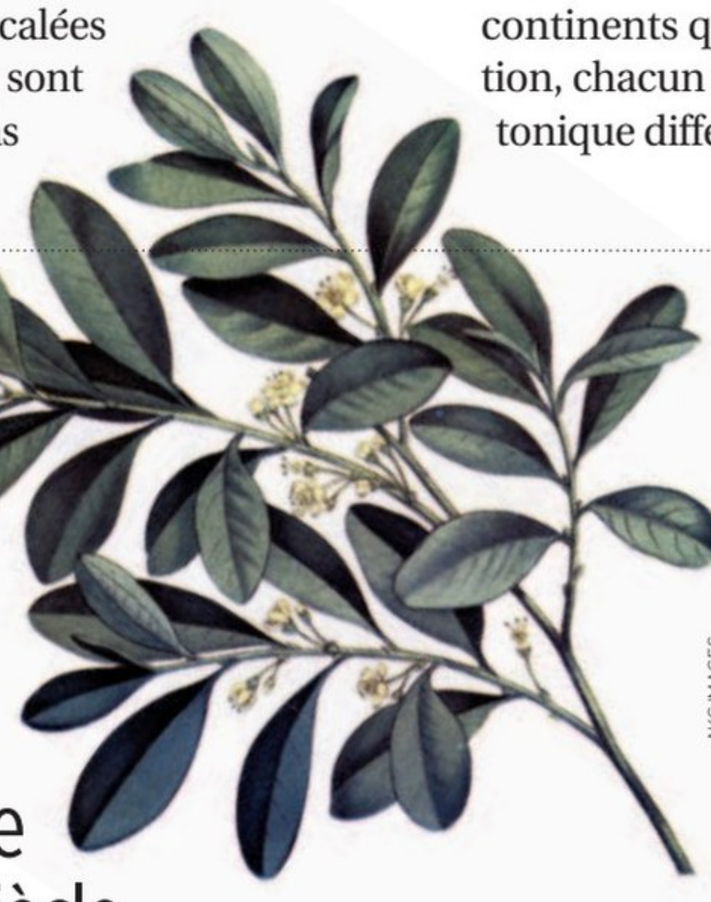
Quand Alfred Wegener proposa en 1912 sa théorie de la dérive des continents, il ne se doutait pas que des dinosaures en apporteraient une confirmation plus d'un siècle après ! Et pourtant, la découverte à près de 6000 km de distance de pistes d'empreintes quasi identiques l'atteste. Identifiées au nord-est du Brésil et au nord du Cameroun, ces quelque 260 empreintes, déposées sur de fines strates de grès intercalées de limon et de boue, sont âgées de 120 millions d'années. Elles signent le passage de plusieurs groupes de dinosaures : herbivores massifs à quatre pattes, ornithischiens aux pieds d'oiseau et une grande majorité de théropodes, de gros carnivores bipèdes. Tous pouvaient circuler librement, le long de fleuves qui formaient des voies végétalisées entrecoupées de lacs, d'un continent à l'autre à travers cette région. Ce territoire unissait encore les deux continents qui étaient en cours de séparation, chacun étant posé sur une plaque tectonique différente. **J. I.**

B. BOURGEOIS ; SOURCE : JACOBS ET AL. - ISMAR DE SOUZA CARVALHO

Comment bien chasser le mammouth

ARCHÉOLOGIE Caler fermement sa lance dans le sol, la pointe de silex vers l'avant, pour que le mammouth fonce s'empaler dessus en chargeant..., telle est peut-être la périlleuse technique de chasse utilisée par les chasseurs-cueilleurs qui vivaient sur le continent américain il y a 13 000 ans. Une hypothèse alternative à la technique du lancer, formulée par une équipe à partir de l'analyse de ces pointes et de représentations artistiques. **S. de L.**

SOURCE : SCOTT BYRAM, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, BERKELEY, ÉTATS-UNIS.



AKG IMAGES

À Milan, de la coca consommée dès le XVIIe siècle

ANTHROPOLOGIE L'analyse des tissus cérébraux de deux patients inhumés au XVIIe siècle dans la crypte de l'Ospedale Maggiore de Milan (Italie) révèle des traces de composants actifs de coca. Un résultat surprenant parce que la plante psychotrope ne faisait pas partie de la pharmacopée de cet hôpital pionnier de la Renaissance, mais surtout parce qu'elle est réputée n'avoir été introduite à cette fin qu'au XIXe siècle en Europe. S. de L.

SOURCE : GAIA GIORDANO, UNIVERSITÉ DE MILAN, ITALIE.

Des éclipses de Lune synonymes de terribles présages

ARCHÉOLOGIE Quatre des plus anciens textes jamais écrits sur les éclipses lunaires, inscrits sur des tablettes d'argile babyloniennes il y a près de 4000 ans, ont été traduits pour la première fois. Pour les Babyloniens, les dieux plaçaient dans le ciel des signes codés sur le destin des rois et de leurs terres. Dans ces quatre cas précis, les présages, au nombre de 61, sont tous catastrophistes : intempéries, famine, baisse de la natalité et même chaos général... **M. B.**

SOURCE : ANDREW GEORGE, UNIVERSITÉ DE LONDRES, ROYAUME-UNI.

ELLE A DIT

« Certaines espèces de ptérosaures volaient à toute allure en battant des ailes, d'autres planaient comme des vautours »

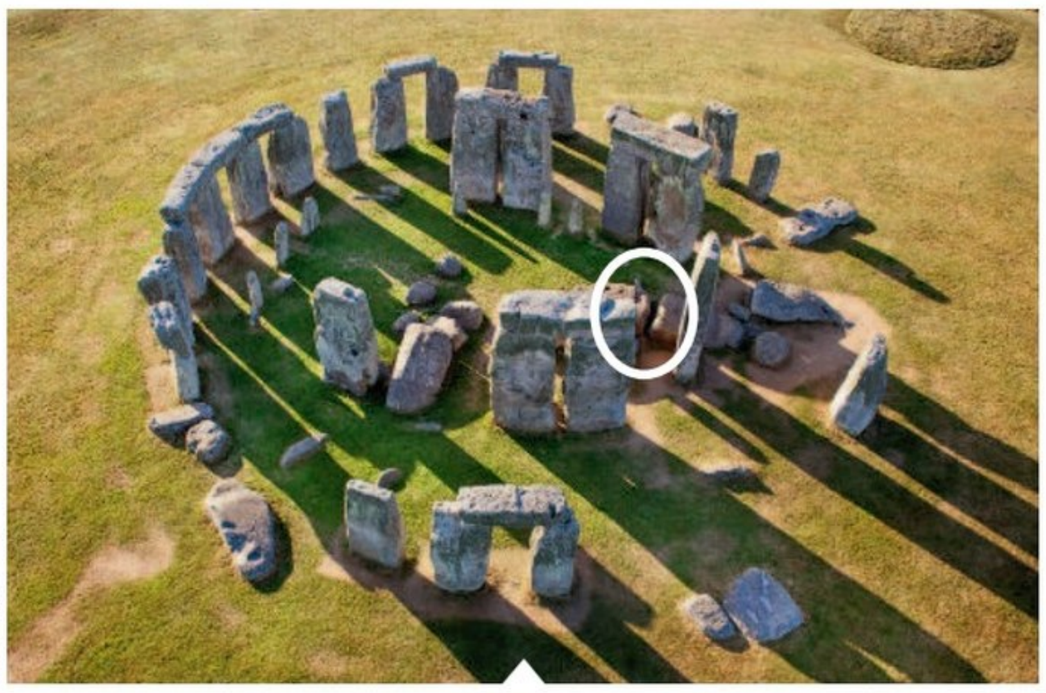
Kierstin Rosenbach, chercheuse au muséum de Paléontologie de l'université du Michigan (États-Unis), confirmant grâce à l'étude de nouveaux fossiles de différentes espèces que ces dinosaures ailés géants étaient bien capables de voler.

STAATLICHE MUSEUMS BERLIN

Détail de la poignée figurant l'un des sept dieux de la chance, Daikokuten.

Un wakizashi du XVIIe siècle découvert à Berlin

ARCHÉOLOGIE Les musées d'État de Berlin rapportent une mystérieuse découverte : celle d'un sabre court enfoui sous des décombres de la Seconde Guerre mondiale, dans une cave du cœur de la capitale. La restauration de cet objet, d'abord pris pour une arme de parade allemande, a révélé un rare wakizashi du XVIIe siècle, une version courte du katana, traditionnellement porté par les samouraïs japonais. Il pourrait s'agir d'un ancien cadeau diplomatique égaré. **H. J.**



AKG IMAGES

Le monument mégalithe vu du ciel. La pierre d'autel (cerclée de blanc), couchée, aurait été transportée d'Écosse il y a 4500 ans.

À Stonehenge, la pierre d'autel est écossaise

PRÉHISTOIRE Une analyse chimique des minéraux issus de fragments de la pierre d'autel du célèbre site de Stonehenge, au sud de l'Angleterre, révèle d'importantes similitudes avec le vieux grès rouge du bassin orcadien situé au nord-est de l'Écosse. Elle aurait donc été transportée sur plus de 750 km à la fin du néolithique. Une prouesse que les spécialistes peinent encore à expliquer. **C. L.**

SOURCE : ANTHONY CLARKE, UNIVERSITÉ CURTIN, AUSTRALIE.

S. COMPOINT / ONLY WORLD / ONLY FRANCE / AFP - ADRIAN SMITH - MONIRUL BHUIYAN / AFP - SARAH BOULVARD

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

ÉGYPTOLOGIE

Le monte-charge hydraulique égyptien battu en brèche

L'étude suggérant qu'un système de monte-charge, relié à un barrage et à une station de traitement de l'eau, aurait servi à la construction de la pyramide de Djoser en Égypte *(lire S. et A. n° 931)* ne convainc pas tout le monde. Architecte et spécialiste des constructions antiques au CNRS, Emmanuel Laroze revient sur cette hypothèse controversée. Interview à lire sur le site de *La Recherche*. **https://bit.ly/932djoser**

PODCAST

Sciences et Avenir à l'écoute

Reportages, enquêtes et décryptages débriefés par nos journalistes en format audio… Retrouvez tous les épisodes de Sixième science, le podcast de *Sciences et Avenir* en collaboration avec *20 Minutes*. **sciav.fr/podcast**

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ…

2 minutes

Le saut périlleux le plus rapide du monde

Arthropode répandu, le collembole peut faire 368 rotations à la seconde. Deux chercheurs ont filmé à haute vitesse les exploits de ce minuscule gymnaste. **sciav.fr/932insect**

5 minutes

Comment sont découverts les gros diamants

Un diamant brut de 2492 carats a été extrait d'une mine du Botswana. À l'origine de cette découverte, un système de tri des minerais ultrasophistiqué. Décryptage. **sciav.fr/932diams**

10 minutes

La science fait parler les crottes de chamois

Reportage vidéo sur les hauteurs de la vallée de Chamonix, où les chercheurs scrutent l'occupation de l'espace par les ongulés sauvages, à travers l'analyse de leurs fèces. **sciav.fr/932chamois**

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

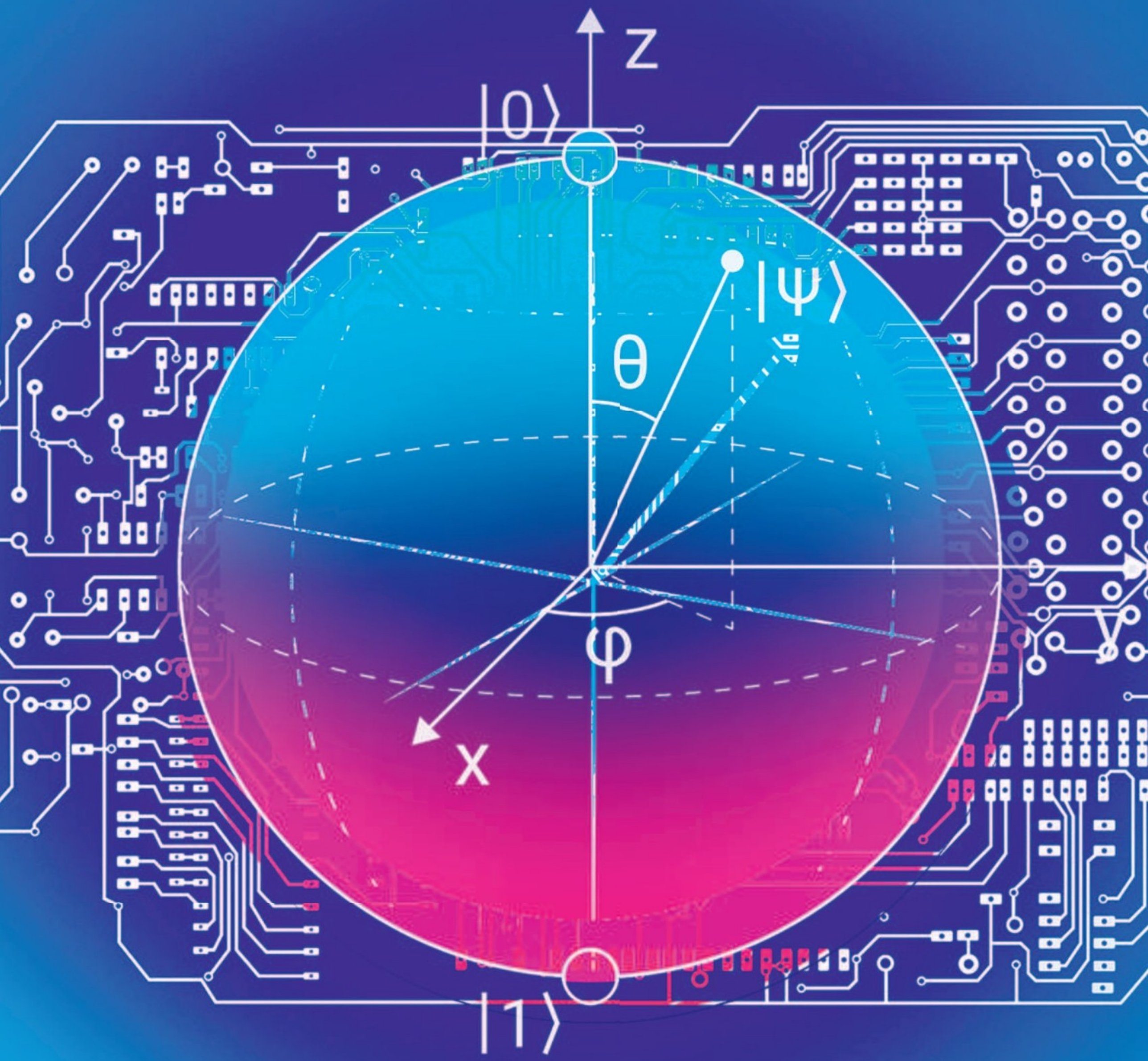
L'ordinateur QUANTIQUE va changer le monde

Elles s'appellent Quandela ou Pasqal… Ces start-up françaises sont à la pointe dans le développement des premiers ordinateurs quantiques. Des machines expérimentales qui préfigurent les calculateurs ultraperformants de demain.

DOSSIER RÉALISÉ PAR
Fabrice Nicot, avec Loïc Duthoit
et Évrard-Ouicem Eljaouhari

Mettre au point de nouveaux médicaments en simulant les propriétés de molécules complexes, modéliser le climat avec une précision inconcevable aujourd'hui, explorer les propriétés de la matière avec une rapidité inouïe… La promesse des ordinateurs quantiques est immense : livrer en quelques secondes des résultats qui, avec les meilleurs supercalculateurs actuels, demanderaient des centaines de milliers, voire des millions d'années. Et l'espoir qu'elle soit un jour tenue n'a jamais été aussi fort. Certes, les premières machines qui sortent des laboratoires sont massives, fragiles, et modestes dans leurs performances. Mais elles existent. Elles fonctionnent. Et elles progressent vite. « *Plus vite que prévu* », se réjouit le prix Nobel Alain Aspect *(lire p. 40)*. Après tout, le premier ordinateur électronique de l'histoire, l'Eniac, construit en 1945, occupait environ 170 m² et pesait 30 tonnes. Quatre-vingts ans plus tard, des ordinateurs bien plus puissants tiennent dans nos poches. C'était inconcevable au début de l'ère électronique. Alors, d'accord, « *la prédiction est un art difficile, surtout lorsqu'elle concerne l'avenir* », comme aurait dit le physicien Niels Bohr. Mais à l'aube d'une nouvelle ère, quantique cette fois, il est permis de rêver aux bouleversements à venir de cette technologie qui n'exploite rien de moins que les propriétés réservées jusqu'ici au monde des atomes et des particules. ■ **F. N.**

M. KULYK/ SPL/ SUCRÉ SALÉ - SHUTTERSTOCK



CONTEXTE
La révolution du calcul quantique
p. 28

ALGORITHMES
Des logiciels à affûter
p. 36

CORRECTION
L'inextricable problème des erreurs de calcul
p. 38

ENTRETIEN
Alain Aspect, prix Nobel de physique
p. 40

SPIN Propriété quantique propre à une particule, liée à sa rotation sur elle-même. Un spin ne peut prendre que des valeurs entières ou demi-entières.

PHOTON Particule élémentaire, sans masse, qui transporte l'énergie électromagnétique et compose la lumière.

SEMI-CONDUCTEUR Matériau ayant une conductivité électrique comprise entre celle des conducteurs et celle des isolants, utilisé surtout dans les composants électroniques.

QUBIT Système quantique (atome, particules élémentaires…) pouvant se trouver simultanément dans deux états et servant d'élément de base pour stocker l'information.

La révolution du calcul quantique

Ces machines issues des propriétés étranges de la physique quantique arrivent enfin sur le marché. Si leurs performances ne sont pas encore au niveau des espoirs qu'elles suscitent, elles s'apprêtent déjà à révolutionner la recherche fondamentale, avant de débouler dans notre quotidien.

L'ordinateur quantique existe. Il y en a même plusieurs. Nous en avons rencontré un à Massy (Essonne) chez Quandela, une start-up fondée en 2017. En mars, elle a livré sa première machine, MosaiQ, à OVHcloud, une société spécialisée dans les services liés au cloud (des serveurs distants pour effectuer des calculs ou stocker des données). Elle comporte deux qubits et servira à générer des nombres aléatoires pour la sécurisation des données en cryptographie. Fin juin, une seconde, de six qubits, était en cours d'assemblage dans l'usine implantée à quelques centaines de mètres du siège, toujours à Massy. Nicolas Maring, qui dirige la partie ingénierie matérielle de Quandela, nous a fait la visite.

Surprise : les conditions sont moins contraignantes que pour une usine de plats surgelés. Une blouse, des surchaussures et le visiteur peut arpenter les salles blanches où s'élabore la fameuse machine. La technologie de Quandela est sophistiquée, mais elle se manipule simplement. « *Nos qubits sont encodés dans des photons, des particules de lumière,* détaille Nicolas Maring. *La prouesse est de les générer un par un, grâce à un dispositif à base de semi-conducteurs issu des travaux de recherche de Pascale Senellart* [cofondatrice de Quandela avec Valérian Giesz et Niccolo Somaschi] *au sein du Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N) du CNRS. Mais pour le reste, c'est juste de l'optique. Les photons transitent* via *des fibres comme pour l'Internet haut débit. Ils interagissent dans un processeur optique fait de lames semi-réfléchissantes et de miroirs, puis finissent dans des capteurs qui doivent être refroidis à -270 °C, mais c'est à la portée de cryostats* [appareils permettant de maintenir une température très basse] *que l'on trouve dans l'industrie.* »

Des machines aux technologies différentes

Une machine presque normale, donc, qui nécessite environ un mois de montage, et un autre de tests avant d'être livrée. Le coût, confidentiel, est d'au moins un million d'euros. Quandela, qui a levé 50 millions d'euros en 2023, ne gagne pas d'argent, comme tout le monde dans ce secteur. Mais elle commence à générer du chiffre d'affaires, notamment grâce à son activité de conseil aux entreprises désireuses de

Les qubits de MosaiQ, développé par Quandela, sont encodés dans des photons qui transitent par des fibres (en médaillon). Le premier exemplaire de cette machine quantique a été inauguré en mars dans un datacenter d'OVHcloud.

OVH CLOUD - C. FRESILLON / QUANDELA / C2N / CNRS IMAGES

se lancer dans le calcul quantique, ou encore sa plateforme de calcul quantique en ligne Quandela Cloud, à travers son kit de développement logiciel Perceval. Quandela n'est pas la seule start-up à proposer une machine. Pasqal, installée également à Massy, en a livré une au Genci (Grand Équipement national de calcul intensif) en juin. En cours de réglage, elle repose sur une technologie différente, à base d'atomes froids. IBM, IonQ et Rigetti aux États-Unis commercialisent également des machines. Pas de quoi élaborer encore un guide d'achat, mais il n'empêche : considéré il y a peu de temps encore comme une promesse aussi merveilleuse que lointaine, l'ordinateur quantique débarque presque en catimini… Étrange. Olivier Ezratty, expert indépendant dans le domaine depuis 2018, éclaire ce paradoxe : « *L'ordinateur quantique arrive très progressivement, comme une image pixélisée qui s'affine lentement. Des machines font leur apparition sur le marché, mais elles ne tiennent pas encore les promesses du calcul quantique consistant à rendre possibles des calculs impossibles sur des supercalculateurs classiques, notamment dans la simulation chimique ou la résolution de problèmes combinatoires complexes.* » Ah ! les promesses… C'est sans doute le domaine le plus foisonnant du secteur aujourd'hui. En substituant le bit élémentaire d'information — 0 ou 1 — à la base des ordinateurs classiques par le qubit, son analogue quantique pouvant prendre la valeur 0, 1 ou un mélange des

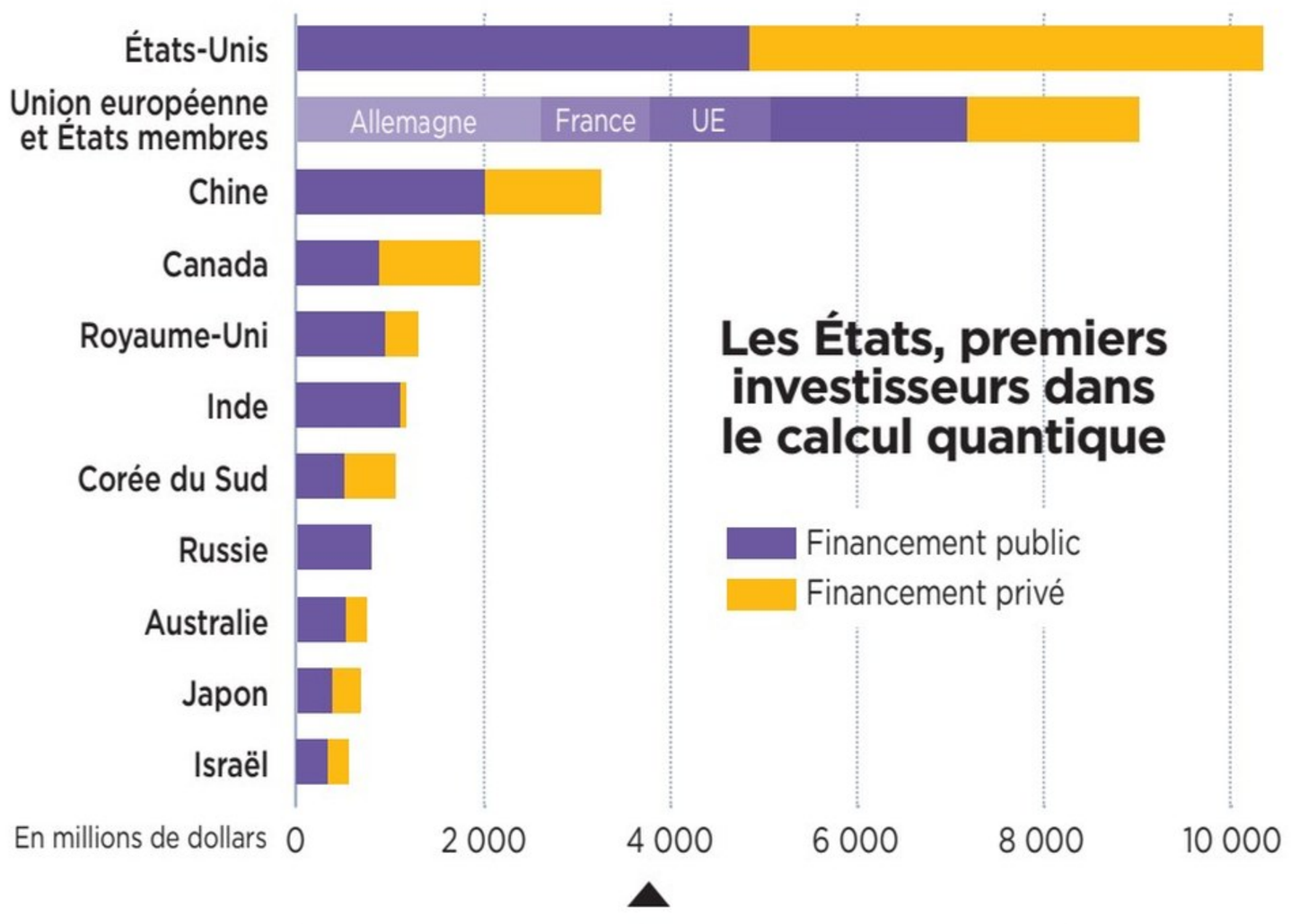
ARNO RICOU

« Vous pouvez aussi bien classer des polymères que déterminer le profil de client capable de rembourser son prêt bancaire »

Arno Ricou, directeur du département applications de la start-up Quandela

DEYAN PAROUCHEV / PASQAL

La start-up Pasqal a développé une machine de plus de 100 qubits à base d'atomes froids pour le Grand équipement national de calcul intensif (Genci)



Montant global par pays des investissements dans le calcul quantique pour la période 2018-2023.

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : OLIVIER EZRATTY

deux *(voir l'infographie p. 32)*, l'ordinateur quantique n'ouvre rien de moins qu'un nouveau champ dans le calcul numérique. Alors que l'ordinateur classique traite les tâches les unes après les autres, son équivalent quantique peut les mener en parallèle. *« En s'appuyant sur de nouveaux algorithmes adaptés au quantique* [lire p. 36], *ce traitement permettra de réaliser rapidement des tâches de classification ou d'optimisation,* résume Arno Ricou, qui dirige le département applications de Quandela. *Ces deux fonctions entraînent une foule d'applications. Vous pouvez aussi bien classer des polymères afin de prédire leurs propriétés physiques et chimiques, que déterminer le profil de client capable de rembourser son prêt bancaire. »*

Sa première utilité : étudier le monde des atomes et particules

Ces algorithmes sont entraînés comme les programmes d'intelligence artificielle (IA) — c'est ce que l'on appelle le « quantum machine learning » — et promettent d'être beaucoup plus rapides, précis, économes en données qu'avec des ordinateurs classiques. Cela débouche sur la plupart des applications de l'IA aujourd'hui, depuis la reconnaissance d'images jusqu'aux modèles de langage. Enfin, s'y ajoutent toutes les tâches d'optimisation : comment distribuer au mieux le courant électrique dans un réseau, déterminer le meilleur parcours d'un porte-conteneurs en fonction de son chargement, de la météo, de la géopolitique… *« Mais là où l'ordinateur quantique sera le plus vite utile,* estime Arno Ricou, *c'est finalement dans le domaine dont il est issu : le monde quantique, celui des atomes et des molécules. »*

L'ordinateur quantique au service du quantique, quoi de plus logique. L'idée est de l'Américain Richard Feynman (1918-1988). En 1982, dans l'*International Journal of Theoritical Physics*, le physicien des particules, nobélisé en 1965, explique que l'ordinateur ultime pour simuler le comportement de la matière

PASQAL

VERBATIM

LOÏC HENRIET DIRECTEUR GÉNÉRAL DE LA START-UP PASQAL

« Le traitement de l'information peut être analogique ou digital »

“Les ordinateurs quantiques ne se différencient pas seulement par le type de qubits qu'ils utilisent. La façon dont ils traitent l'information varie également. La méthode digitale est la plus traditionnelle. Elle est utilisée aujourd'hui dans tous les ordinateurs classiques et par beaucoup d'acteurs du quantique [IBM, Google, Quandela, etc.]. Elle consiste à décomposer un algorithme en une série d'opérations élémentaires, des portes logiques. Elle introduit un niveau d'abstraction supplémentaire, le codage *via* des portes quantiques, et donc des erreurs du fait de la manipulation des qubits. Chez Pasqal, nous avons choisi une autre voie, dite analogique, qui était aussi présente aux débuts de l'ère informatique « classique ». Dans ce cas, il n'y a plus de portes. Nous sommes en prise directe avec les qubits [des atomes de rubidium] qui représentent physiquement l'information. Nos algorithmes ne sont plus des séries de portes, mais des impulsions laser appliquées directement sur les qubits placés à des endroits précis. Les opérations de calcul sont issues de l'évolution continue des qubits sous l'effet du laser. Cette façon de faire diminue les erreurs, et permet d'utiliser au mieux les capacités de nos machines. Plus tard, lorsque les codes correcteurs d'erreurs seront plus efficaces *[lire « L'inextricable problème des erreurs de calcul » p. 38]*, nous pourrons revenir vers l'approche digitale plus conventionnelle.”

sera quantique, comme la matière. Il reprend ainsi les propos qu'il avait tenus en 1981 lors d'un colloque réunissant pour la première fois les plus grands noms de la physique fondamentale et de l'informatique. IBM était l'un des organisateurs. Quarante ans plus tard, la multinationale est un des leaders incontestés du domaine. Et selon Xavier Vasques, son directeur technique, IBM est précisément en train de démontrer la supériorité de l'ordinateur quantique sur le classique dans l'étude de la matière. *« En 2023, une de nos équipes de recherche, en collaboration avec l'université de Berkeley, aux États-Unis, a simulé un système physique quantique : un ensemble de spins* [une propriété intrinsèque des particules élémentaires]. *Ils ont cherché à savoir comment ils interagissaient, en simulant ce système sur un ordinateur classique et un ordinateur quantique. Puis ils ont complexifié le système en ajoutant des spins. Le supercalculateur classique a atteint ses limites, tandis que notre processeur quantique a continué de fournir des résultats. »*

L'article en question a fait la couverture de la revue *Nature* du 15 juin 2023. *« L'image pixélisée de l'ordinateur quantique »*, chère à Olivier Ezratty, serait-elle devenue d'un coup plus nette ? *« C'est un joli résultat qui prouve la qualité de leur machine à 133 qubits, Heron,* note l'expert. *Mais les applications rendues possibles par ce système concernent des problèmes de physique fondamentale relativement simples qui sont assez éloignés des besoins des entreprises. Par ailleurs, après cet article, des chercheurs ont répondu en expliquant pouvoir résoudre les mêmes problèmes classiquement. L'avantage quantique générique n'est toujours pas démontré, même s'il y a des progrès certains. »* IBM a poursuivi sa course et mis en ligne au printemps dernier une nouvelle version du processeur Heron à 156 qubits et de meilleure qualité. La logique du géant américain consiste désormais à lier ces microprocesseurs entre eux, comme des briques de Lego. Jusqu'à sept de ces processeurs pourront ainsi constituer un superprocesseur de 1092 qubits.

Les États n'hésitent pas à passer commande

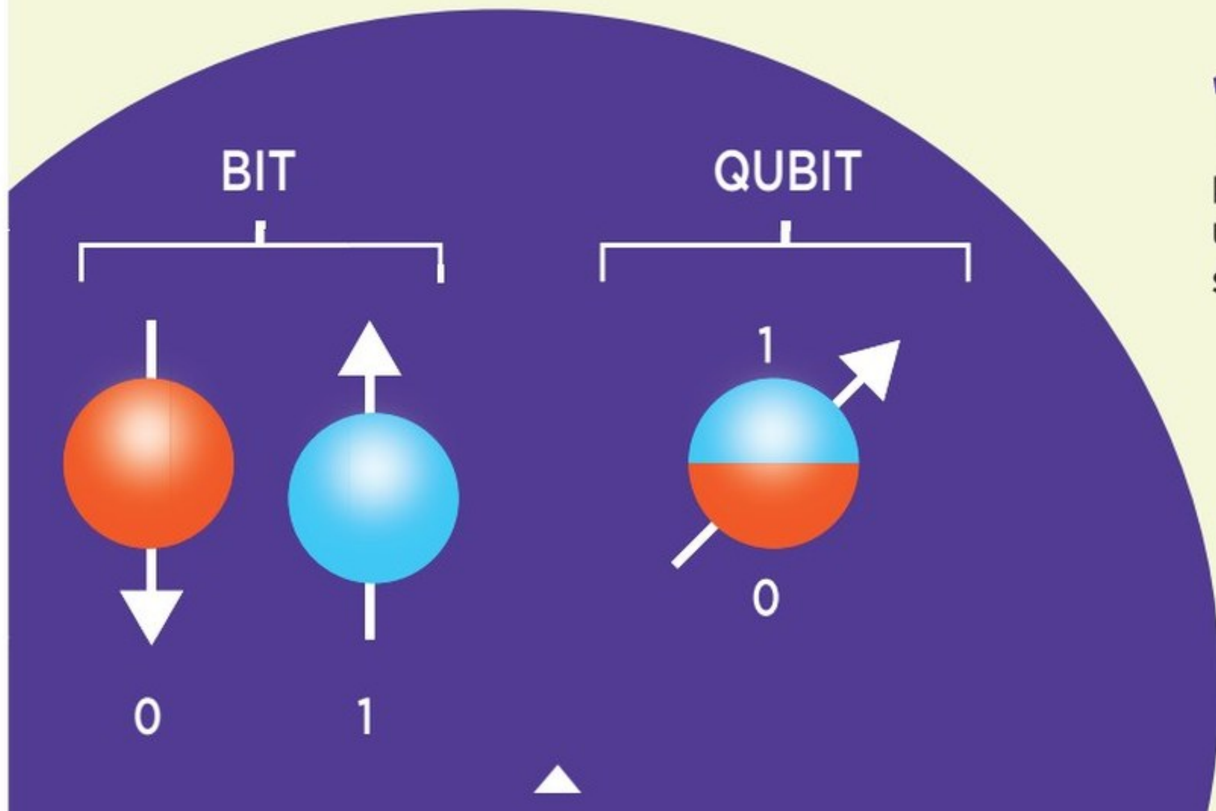
Plusieurs indices montrent que de plus en plus d'acteurs croient en l'avènement de l'ordinateur quantique. Les financements mondiaux atteignent presque les trente milliards d'euros sur cinq ans selon notre infographie *(ci-contre)*. Ils sont essentiellement publics, même si les start-up ont levé dans le monde 1,71 milliard de dollars en 2023, 2,35 milliards de dollars atteints en 2022, d'après le cabinet McKinsey. Côté français, Pasqal a récolté 100 millions d'euros en 2023, Quandela la moitié. C12, une start-up issue du laboratoire de physique de l'École normale supé-

rieure de Paris, vient de lever 18 millions d'euros.
Néanmoins, les États restent les principaux animateurs de marché, n'hésitant pas à passer commande. C'est le cas du Genci qui a acquis en juin 2022 un ordinateur Pasqal, en cours d'installation dans les locaux du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), à Bruyères-le-Châtel. *« Le Genci est un établissement à financement 100 % public qui met gratuitement à la disposition de la recherche des calculateurs de haute performance,* rappelle Sabine Mehr, responsable de la branche calcul quantique de l'infrastructure de recherche. *En novembre 2021, nous avons été chargés par la coordination nationale de la stratégie quantique, qui dépend des services du Premier ministre, d'étudier l'acquisition des premiers prototypes de calculateurs quantiques pour les besoins d'un programme appelé HQI (France Hybrid HPC Quantum Initiative), piloté par le CEA.* » En janvier de la même année, le président de la République Emmanuel Macron avait lancé le plan quantique doté de 1,8 milliard d'euros sur cinq ans, dont un milliard de financements de l'État. Il vise à développer le calcul quantique, mais aussi les technologies associées

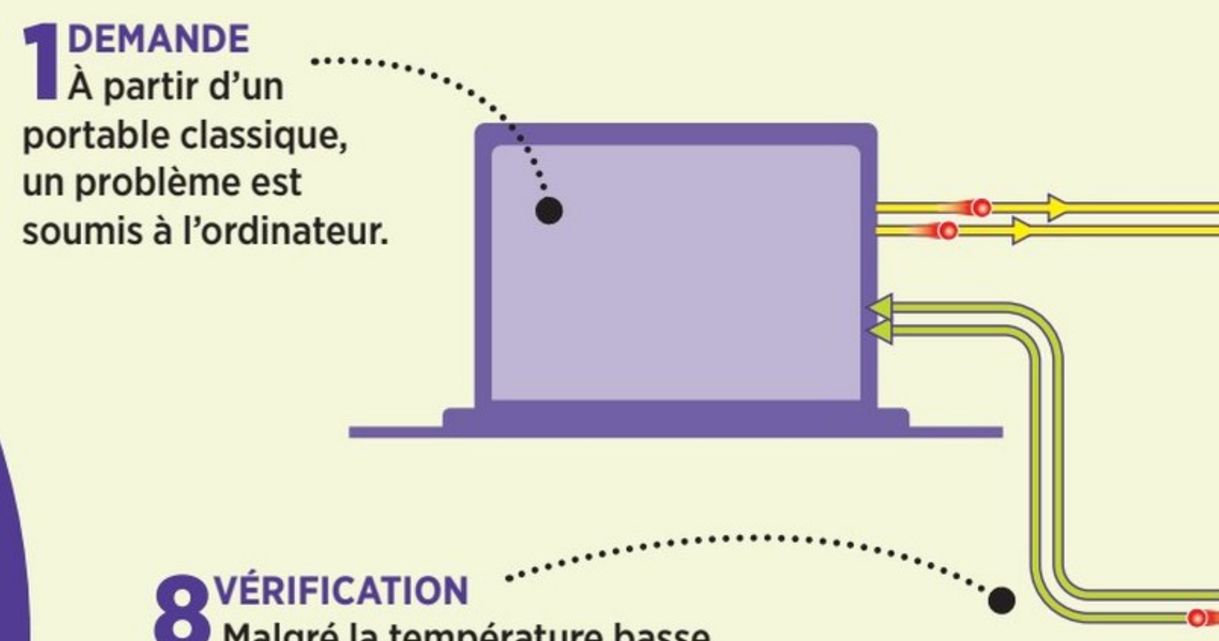
TECHNOLOGIE

Comment fonctionne un ordinateur quantique

L'ordinateur quantique repose sur deux des principes fondamentaux de la mécanique quantique qui régit le monde des atomes et des particules : la superposition et l'intrication. La superposition est utilisée au niveau des qubits, éléments de base d'information. Ils sont l'équivalent des bits en informatique classique. Mais si les bits ne prennent que deux valeurs, 0 ou 1, les qubits peuvent valoir 0, 1, ou une combinaison des deux à la fois grâce à la superposition quantique. L'intrication, quant à elle, permet à deux qubits de devenir si étroitement liés que l'état de l'un dépend instantanément de l'état de l'autre, quelle que soit la distance les séparant. Cette propriété est utilisée pour augmenter la vitesse et la capacité de calcul.
L'infographie montre ici le fonctionnement d'un ordinateur quantique utilisant des qubits supraconducteurs, comme IBM par exemple. Les qubits nécessitent d'être refroidis à -273 °C, d'où la taille de l'installation intégrant un cryostat. Mais d'autres technologies, comme les photons, sont bien plus compactes car elles fonctionnent à température ambiante.



Contrairement au bit classique qui ne possède que deux états, représentés ici par une flèche qui ne peut pointer que dans deux directions, un qubit peut pointer dans n'importe quelle direction car il est une combinaison de ces deux états.

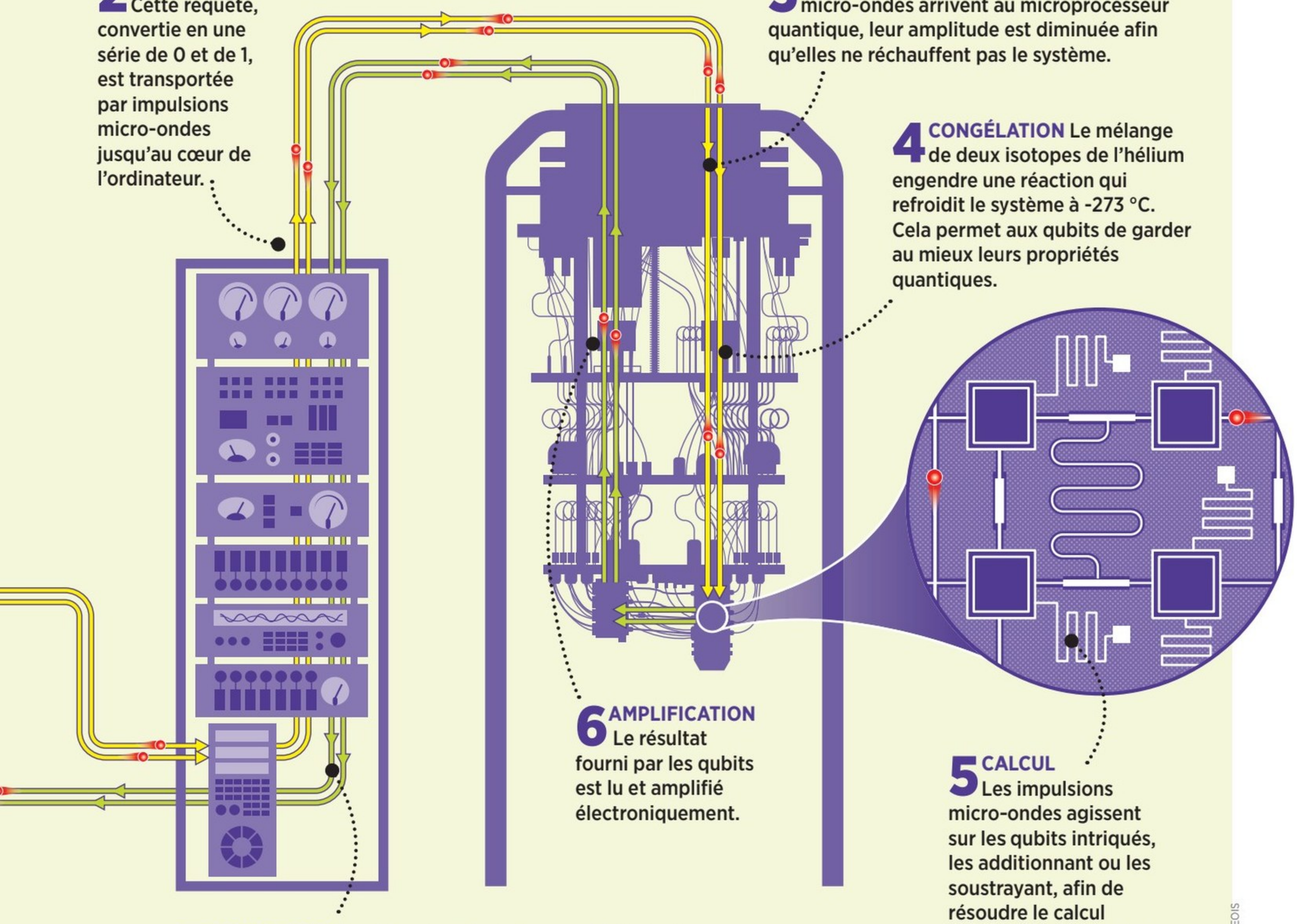


1 DEMANDE
À partir d'un portable classique, un problème est soumis à l'ordinateur.

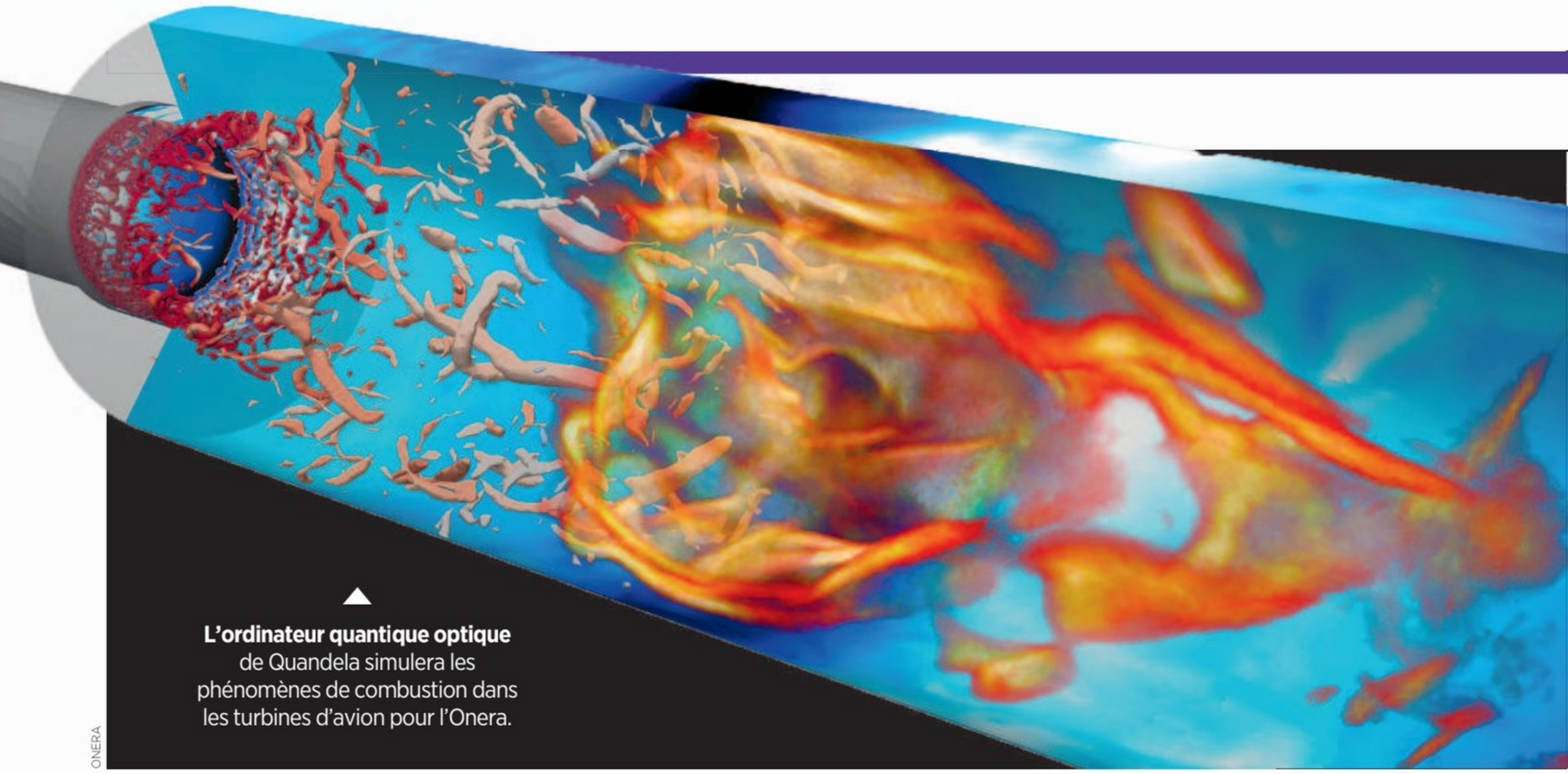
8 VÉRIFICATION
Malgré la température basse, les qubits ont tendance à perdre leurs propriétés quantiques durant le calcul. Il faut donc le refaire plusieurs fois avant d'être sûr que le résultat affiché est bon. Cette étape de vérification est plus longue que le calcul lui-même.

(capteurs, communications, cryptographie post-quantique…). C'est donc dans ce cadre que le Genci a acquis la machine de Pasqal, avec une philosophie bien particulière. *« Nous n'envisageons le calcul quantique que dans le cadre d'une hybridation avec le supercalculateur classique Joliot-Curie exploité par le CEA, et auquel il sera relié,* détaille Sabine Mehr. *Pour nous, c'est un moyen d'accélérer certaines parties d'un calcul, mais pas de l'effectuer tout entier.* » Et pourquoi avoir choisi Pasqal ? *« Ils utilisent une technologie analogique, à base d'atomes froids, et nous préférions commencer l'aventure avec cette approche plutôt que l'approche digitale* [lire l'encadré p. 31]. *En 2021, nous la trouvions plus robuste et davantage susceptible d'être hybridée. D'ailleurs, notre homologue allemand, le supercalculateur de Jülich (Rhénanie-du-Nord-Westphalie), a fait le même choix.* »

Une fois la machine opérationnelle, vers la fin de l'année, le Genci et Pasqal apprendront à travailler ensemble sur cette installation mi-classique mi-quantique. *« Nous devons tout inventer,* résume Félix Givois, ingénieur projets en calcul quantique au Genci. *Et notamment déterminer quels sont les cas d'usage adaptés à cette machine. L'or-*



BRUNO BOURGEOIS



L'ordinateur quantique optique de Quandela simulera les phénomènes de combustion dans les turbines d'avion pour l'Onera.

ONERA

dinateur quantique analogique Pasqal sait par exemple résoudre des problèmes de type MIS (Maximum Independent Set) issus de la théorie des graphes en mathématiques. Nous devrons aider les scientifiques à formuler leur problématique dans ce cadre-là. Mais les problèmes d'optimisation peuvent être assez efficacement traduits en MIS, donc les cas d'usage devraient être nombreux. » Le partenariat Pasqal-Genci n'a toutefois pas vocation à être exclusif, comme le souligne Sabine Mehr. « *La stratégie française, et européenne, n'est pas de privilégier une machine plutôt qu'une autre. Comme nous ignorons quelle technologie s'imposera, et même si une technologie s'imposera, nous en explorerons le plus possible. Ainsi, nous hébergerons bientôt un calculateur photonique. Cela pourra être Quandela, mais il y a d'autres acteurs au Pays-Bas et en Allemagne. L'appel d'offres est en cours.* »

Progresser conjointement sur le hardware et le software

Autre acteur de poids investi dans le calcul quantique : l'Onera (Office national d'études et de recherches aérospatiales). L'établissement a noué un partenariat scientifique avec Quandela en octobre 2022. La start-up est mise à contribution pour simuler les phénomènes de combustion dans les turbines d'avion. Un peu comme pour le Genci, il s'agit surtout pour le centre de recherche en aérospatiale de ne pas rater le train du calcul quantique, malgré les incertitudes sur le type d'applications qu'il pourra en tirer, comme l'explique Alain Refloch, en charge du calcul quantique à l'Onera : « *Nous sommes par nature un grand utilisateur de supercalculateurs. L'étude de la mécanique des fluides, le cœur de notre activité, nous confronte à des équations très complexes que l'on ne peut résoudre complètement.* » Ainsi, pour déterminer le comportement des gaz qui brûlent dans une turbine d'avion, les chercheurs de l'Onera sont amenés à décomposer l'intérieur de la turbine en des dizaines de millions de points où ils calculent en chacun la température, la pression, etc. Il s'agit grâce à cela, par exemple, d'optimiser l'injection de carburant, de prolonger la durée de vie des turbines… « *Mais il faut une puissance de calcul considérable,* ajoute Alain Refloch, *et nous ne pouvons pas ignorer les potentialités offertes par l'ordinateur quantique.* » Et ce d'autant plus que les simulations atteignent aujourd'hui de tels niveaux qu'elles commencent à coûter très cher en temps de calcul et en énergie. « *Les prochains supercalculateurs classiques dits exaflopiques nécessiteront une puissance de 20 mégawatts,* explique le chercheur. *Et malgré leur performance, le temps de calcul risque de devenir exponentiel. Avec les calculateurs quantiques, nous espérons diminuer ce temps notablement, ainsi que la consommation électrique.* »

PROGRAMME PROQCIMA

La DGA lance la compétition

Lancé le 6 mars par la Direction générale de l'armement, le programme Proqcima * vise à disposer de deux ordinateurs quantiques de 128 qubits logiques d'ici à 2032. Doté d'un budget de 500 millions euros, il établit un partenariat entre l'État et les cinq principaux acteurs français du secteur : Alice&Bob, C12, Pasqal, Quandela et Quobly. Pour l'État, c'est une démonstration supplémentaire de l'importance qu'il accorde à ce secteur, et l'occasion de garantir la souveraineté de la France dans les domaines stratégiques de la cryptographie et des communications. La compétition est ainsi lancée entre les cinq start-up qui devront réaliser leur machine en trois étapes : la preuve de concept, la maturation puis l'industrialisation.

* Programme pour la recherche et l'optimisation des qubits et des calculs en informatique et matériaux avancés.

Cinq techniques pour fabriquer des qubits

Supraconducteur

▸ Atome simulé à l'aide d'un circuit électrique de la taille du micromètre, placé à très basse température de telle sorte qu'il devienne supraconducteur. L'information est codée par le sens du passage du courant dans le circuit.

Ion piégé

▸ On retire à un atome un ou plusieurs de ses électrons pour en faire un ion que l'on va ensuite piéger sous vide à l'aide de lasers. L'information est stockée grâce à l'orientation du champ magnétique des ions, mesuré par laser.

Photons

▸ Les photons sont les particules qui constituent la lumière. Pour coder l'information, on peut utiliser la polarisation, la couleur, la forme spatiale ou temporelle des photons.

Atomes

▸ Les qubits atomiques utilisent des états quantiques d'atomes individuels. Les transitions entre niveaux d'énergie des atomes, contrôlées par des lasers ou des micro-ondes, représentent les 0 et 1.

Silicium

▸ Un électron est piégé sur un substrat de silicium. Les états 0 et 1 sont représentés par le spin de l'électron qui peut être « haut » ou « bas ». Le spin lui-même est manipulé avec un champ magnétique.

BRUNO BOURGEOIS

Pour l'heure, la collaboration n'a pas encore débouché sur des résultats mettant en évidence un avantage en temps de calcul. Il s'agit surtout, là encore, de faire connaissance. « *Nous nous approprions le calcul quantique* via *la plateforme Perceval de Quandela. Et nous fournissons à Quandela un cas d'usage : la modélisation en mécanique des fluides. Or, plus il y aura de cas d'usage, plus l'ordinateur quantique aura des chances de se développer.* »

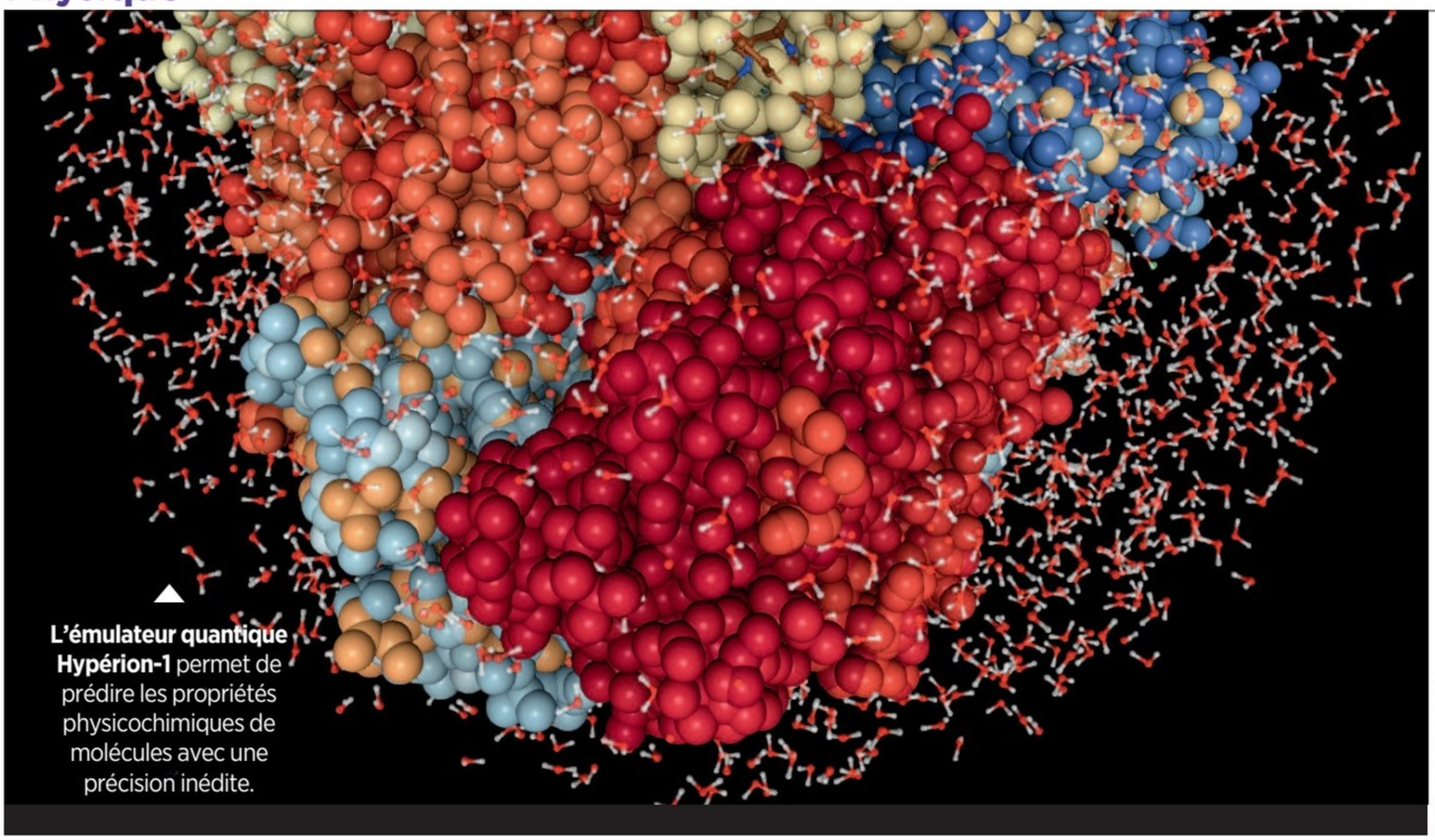
L'image de l'ordinateur quantique et de ses usages se précise, mais quand pourra-t-on parler d'avènement ? « *Si cela arrive, cela se fera très progressivement,* estime Olivier Ezratty. *L'utilité de l'ordinateur quantique dépendra des cas d'usage. Or, une idée fausse circule selon laquelle le calcul quantique est instantané. Il sera potentiellement diminué de plusieurs ordres de grandeur, c'est vrai, mais il peut prendre du temps.* » Un temps plus ou moins acceptable selon les applications. L'expert prend l'exemple de la simulation de molécules chimiques afin d'élaborer de nouveaux médicaments : « *Si elle prend trois mois au lieu de 10 000 ans, on comprend tout de suite l'intérêt. En revanche, s'il s'agit d'optimiser la distribution d'énergie renouvelable dans le réseau électrique, les trois mois ne sont plus acceptables. Le temps de réponse attendu est plutôt de l'ordre de la minute. L'ordinateur quantique devra démontrer sa pertinence et sa supériorité au cas par cas.* » Par ailleurs, l'ordinateur quantique ne doit pas s'envisager que sous l'angle de la machine. Les logiciels progressent et pourraient bien aussi changer la donne. Le 10 juillet, Qubit Pharmaceuticals, en partenariat avec Sorbonne Université, annonçait une percée majeure. La société est spécialisée dans la mise au point de nouvelles molécules médicamenteuses en modélisant avec une grande précision leurs propriétés physicochimiques.

Ce qui nécessite des calculs complexes qu'elle se propose de faire en partie avec des ordinateurs quantiques, qui n'ont pas encore le niveau suffisant. En développant de nouveaux algorithmes utilisant à la fois les capacités des supercalculateurs et des ordinateurs quantiques, l'entreprise est parvenue à diminuer par dix le nombre de qubits normalement nécessaires pour faire les calculs. Cette démonstration repose sur un émulateur, un dispositif qui utilise un ordinateur classique pour exécuter un algorithme quantique conçu pour un ordinateur quantique. En émulant un ordinateur de 32 qubits, les chercheurs sont ainsi par- ▸

ALAIN REFLOCH

« Plus il y aura de cas d'usage, plus l'ordinateur quantique aura des chances de se développer »

Alain Refloch, chargé de mission calcul quantique à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (Onera)



L'émulateur quantique Hypérion-1 permet de prédire les propriétés physicochimiques de molécules avec une précision inédite.

QUBIT PHARMACEUTICALS

venus à prédire les propriétés physicochimiques de l'azote, du fluorure d'hydrogène ou de l'eau. Normalement, il aurait fallu 250 qubits.

« Ces travaux montrent bien la nécessité de progresser conjointement sur le développement du hardware et du software, déclarait Jean-Philip Piquemal, cofondateur et directeur scientifique de Qubit Pharmaceuticals, lors d'une conférence de presse en juillet. *C'est en réalisant des percées sur les deux fronts que nous pourrons entrer dans l'ère de la "quantum utility" pour la découverte de médicaments à très court terme.* » Un constat que partage Olivier Ezratty : *« Pendant que les acteurs du quantique tentent d'accélérer l'exécution de leurs algorithmes, ceux du classique ne se tournent pas les pouces,* note-t-il. *Il y a une forte émulation et eux aussi progressent. Donc on ne peut pas honnêtement dire quand l'ordinateur quantique supplantera le classique, ni même s'il le supplantera.* » Ce qui est en revanche certain, c'est qu'il est en train de doper tout le secteur du calcul numérique. ■ **F. N.**

Algorithmes : des logiciels à affûter

Pour exploiter pleinement les ordinateurs quantiques et leurs qubits, une nouvelle algorithmique s'élabore autour de portes quantiques aux propriétés surprenantes. Cette évolution en cours bénéficie également aux algorithmes classiques qui gagnent en efficacité.

Disposer d'un ordinateur quantique sans logiciel pour l'exploiter reviendrait à s'asseoir devant un piano sans savoir en jouer : ses performances demeureraient théoriques. Ainsi, tandis que les machines se perfectionnent, toute une recherche s'active pour développer des programmes à la hauteur de leurs potentialités. Ce qui nécessite de revisiter de fond en comble l'algorithmique…

Un algorithme, quantique ou classique, est une série d'opérations destinées à effectuer une tâche bien précise : classer des nombres par ordre croissant ou décroissant, chercher un mot dans une liste, faire des additions… Elles reposent sur la manipulation de bits (pour

« binary digit », ou « chiffre binaire »), unité de base de l'information. Un bit peut prendre deux valeurs, 0 ou 1. Cela peut correspondre à la présence (1) ou non (0) d'une tension électrique aux bornes d'un circuit, par exemple.

Utiliser les propriétés ondulatoires des qubits

Toute la révolution quantique vient du fait que ce bit est remplacé par un qubit, comme l'explique Sophie Laplante, chercheuse à l'Institut de recherche en informatique fondamentale (Irif-université Paris Cité). *« Leur nature est complètement différente. Les qubits sont des objets quantiques* [photon, ion, atome…]. *Ils possèdent donc des propriétés quantiques, comme la possibilité d'être dans deux états à la fois. Ainsi, un bit ne peut être que dans l'état 0 ou 1. Tandis qu'un qubit peut valoir 50 % 0 et 50 % 1, ou bien 80 % 0 et 20 % 1. »*
Autre différence de taille, les qubits se comportent comme des ondes, à l'instar de toutes les particules. On peut se les représenter comme des vagues, ou des vibrations de l'air. *« Tout l'art consiste à utiliser ces propriétés ondulatoires pour réaliser des opérations, essentiellement* via *le phénomène d'interférence »*, résume la chercheuse.
Or troquer des courants électriques pour des ondes rend d'un coup caduques les portes logiques, des mini-circuits électroniques qui réalisent des opérations élémentaires sur les bits. *« Prenez une porte logique dite ET,* illustre Sophie Laplante. *Si deux bits 1 se présentent en entrée, elle renvoie 1 en sortie. Dans tous les autres cas, elle renvoie 0. Elle ne fonctionnera pas avec des qubits car ils ne vaudront pas forcément 0 ou 1, mais une combinaison des deux. L'informatique quantique nécessite donc de redéfinir les portes logiques pour les transformer en portes quantiques. »*
Ces portes existent conceptuellement depuis les années 1980 : Porte Hadamard, porte Pauli-X, Y et Z, porte Swap… Bien plus exotiques, elles n'ont rien à voir avec les portes logiques. Ainsi, la porte Hadamard crée des superpositions d'états quantiques au sein d'un même qubit. Les informaticiens les manipulent sur le papier depuis bien avant la mise au point des premiers ordinateurs quantiques. Sans compter que rien n'empêche de simuler sur ordinateur classique le comportement de qubits, jusqu'à une trentaine environ. Cela a suffi pour défricher le domaine dès les années 1990. Lov Grover, un chercheur indo-américain qui a longtemps œuvré aux laboratoires Bell (New Jersey, États-Unis), est à l'origine d'un célèbre programme capable de rechercher un nom dans une liste. Sa méthode est radicalement différente de celle d'un ordinateur classique qui va interroger la liste jusqu'à ce qu'il trouve le mot cherché. Cela peut nécessiter un million d'opérations s'il y a un million d'objets… Dans le même cas, l'algorithme de Grover n'a besoin que de 1000 opérations.

> « L'informatique quantique nécessite de redéfinir les portes logiques pour les transformer en portes quantiques »
> **Sophie Laplante,** chercheuse à l'Institut de recherche en informatique fondamentale (Irif-université Paris Cité)

Un algorithme qui fait émerger la réponse peu à peu

Le principe consiste à coder les mots en langage binaire sur les qubits. Puis de jouer sur le caractère ondulatoire des qubits afin de les faire interférer entre eux. Pour cela, la phase de l'onde associée à l'élément que l'on cherche est inversée. En faisant interférer l'onde « marquée » avec tous les mots de la liste simultanément, l'algorithme fait peu à peu émerger celui recherché car l'onde marquée s'additionne à celle du mot présent dans la liste, et se soustrait aux autres. Forcément, il sort du lot. *« Au bout de 1000 itérations, le mot est repéré avec une précision suffisante »*, conclut Sophie Laplante.
Autre algorithme fondateur : celui de Peter Shor, un mathématicien américain du Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, États-Unis). Il décompose des grands nombres en un produit de nombres premiers (qui ne sont divisibles que par 1 et par eux-mêmes, par exemple : 45 = 3 x 3 x 5). Sa réalisation par des ordinateurs quantiques suffisamment puissants mettrait en péril les protocoles de cryptographie actuels. Il date de 1994. *« Il est frappant de constater que les algorithmes principaux ont été trouvés il y a trente ans,* constate Simon Apers, chercheur à l'Irif. *Beaucoup des travaux réalisés depuis ont pour origine ces algorithmes fondateurs. Ainsi, l'algorithme d'Ambainis, en 2004, est une généralisation de Grover. Il permet de déterminer si une liste comporte deux éléments identiques, sans savoir quels sont ces éléments au départ. »*
Aujourd'hui, une des pistes les plus prometteuses consiste à exploiter l'algorithme HHL, du nom de ses auteurs (Aram Harrow, Avinatan Hassidim et Seth Lloyd), découvert en 2008. Il résout à la manière quantique des équations linéaires du type ax = b. Cela débouche sur de très nombreuses applications, en économie pour l'optimisation de portefeuilles en fonction du risque, pour la simulation de molécules en chimie, l'apprentissage automatique (machine learning)…
Mais selon Simon Apers, les potentialités de HHL sont bien plus grandes. *« Cet algorithme offre la possibilité de manipuler des matrices* [des tableaux de don-

nées], *de les multiplier entre elles ou de les inverser à une vitesse exponentielle par rapport aux méthodes classiques… La difficulté consiste à lire le résultat. Car il est présenté sous une forme quantique qui est détruite lorsque l'on cherche à la connaître.* » C'est en effet une autre particularité, fâcheuse, du monde quantique : lire le contenu d'un qubit fait disparaître ses propriétés quantiques, et les informations qu'il contenait.

Malgré cela, c'est l'une des perspectives les plus prometteuses dans ce domaine car elle constitue la base d'une « algèbre linéaire quantique », en termes mathématiques. « *Elle pourrait nous mener vers une grande unification des algorithmes quantiques, dans le même esprit que l'unification des théories en physique, avec la possibilité de reformuler les algorithmes existants pour les rendre plus efficaces, mais aussi d'en mettre au point de nouveaux* », ajoute Simon Apers.

Le calcul classique stimulé par le quantique

En attendant, l'algorithmique quantique stimule déjà son homologue classique, avec des conséquences bien plus proches de nous qu'on ne l'imagine, comme les algorithmes de recommandation des plateformes TV… « *À l'origine, on pensait que seule la voie quantique pouvait mener à des algorithmes de recommandation vraiment efficaces,* explique Simon Apers. *Mais lorsqu'une étudiante de l'université du Texas, aux États-Unis, Ewin Tang, a voulu démontrer cela en 2018 — à 17 ans ! —, elle est au contraire parvenue à trouver une méthode classique aussi bonne que la version quantique.* » Résoudre des problèmes par l'ordinateur quantique mais sans l'ordinateur quantique, quoi de plus quantique après tout. ■ **F. N.**

L'inextricable problème des erreurs de calcul

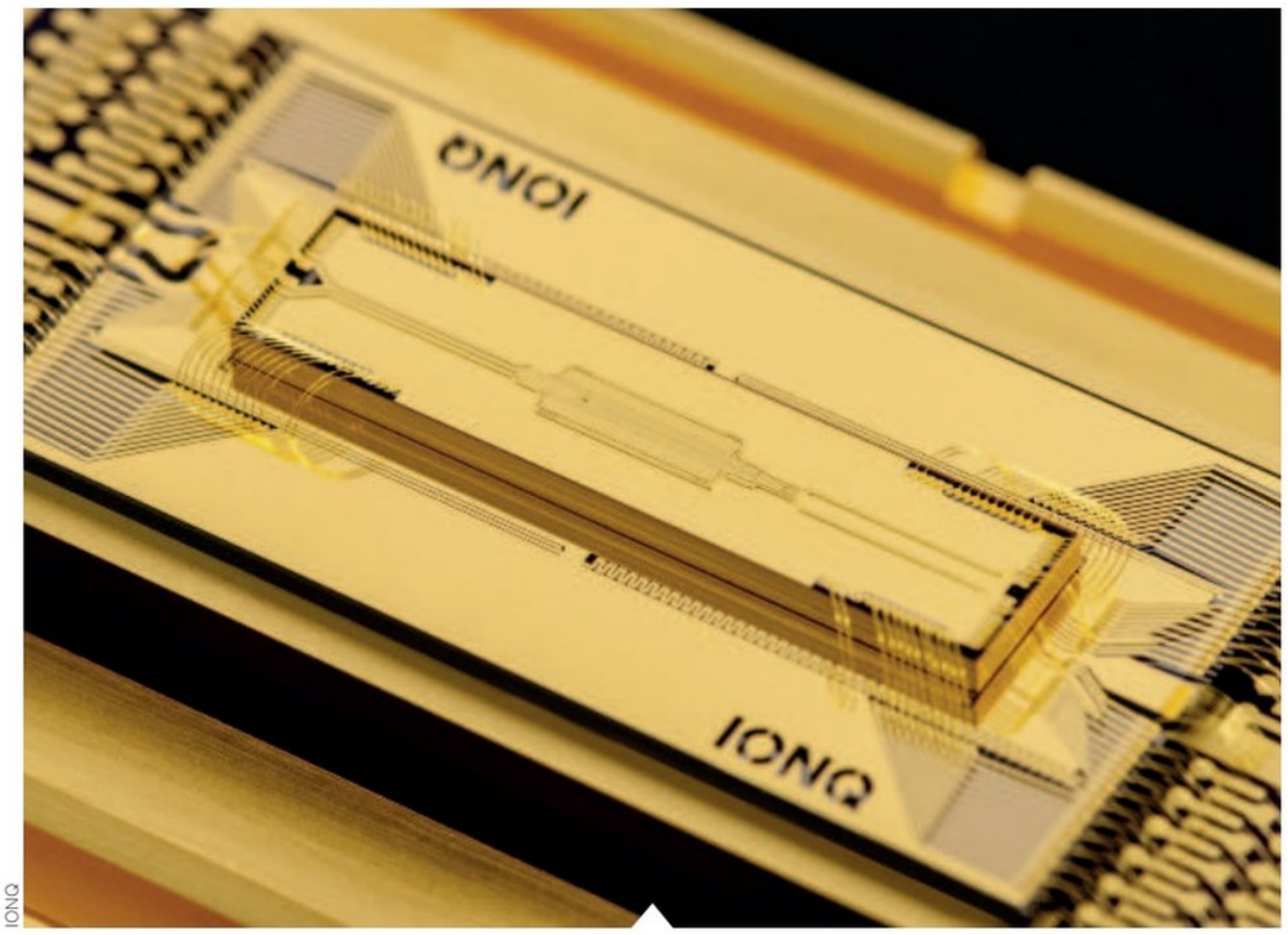
Les délicats qubits perdent facilement leurs propriétés quantiques, occasionnant des erreurs de calcul. Deux méthodes très différentes, la mitigation et les codes correcteurs, tentent de résoudre ce problème.

Une clé USB « 32 Go » ne fait pas 32 gigaoctets. Ce qui est annoncé, c'est la capacité nette. Sa capacité brute est plus grande. Cela permet de faire de la correction d'erreurs. Ordinateurs, téléphones… Partout, l'information est partiellement redondante de manière à pouvoir corriger un bit défaillant. Il en va de même pour un ordinateur quantique, mais dans des proportions incomparables. « *Aujourd'hui, nos ordinateurs quantiques font en moyenne une erreur toutes les mille opérations ; dans nos téléphones, c'est une erreur tous les un million de milliards d'opérations* », illustre Nicolas Delfosse, à la tête de l'équipe de recherche sur la correction d'erreurs d'IonQ. Et le constat ne changera pas drastiquement. Le manque de fiabilité est inhérent aux qubits. Dans un ordinateur quantique, les fautes peuvent en effet arriver à tout moment. C'est ce qu'on appelle la décohérence, quand un qubit perd son état quantique. Il n'est alors plus à la fois 1 et 0 en même temps, il devient, comme un bit classique, soit 1, soit 0, ce qui fausse le calcul. Plus le temps passe, plus il y a de chances que cela arrive. Puisqu'elles sont inéluctables, que faire de ces erreurs ?

Les idéalistes rêvent d'une machine qui corrige ses fautes au fil de l'eau et pourrait tourner théoriquement à l'infini : l'ordinateur tolérant aux fautes (le large scale quantum, ou LSQ). Les pragmatiques croient, eux, en des méthodes qui atténuent les effets des erreurs sur le résultat final, de sorte qu'un ordinateur quantique « bruité » (c'est-à-dire commettant des erreurs) pourrait sortir des résultats intéressants quand même. Ce type de machine est appelé NISQ (noisy intermediate scale quantum). Ici, les erreurs ne sont plus corrigées, mais « mitigées ».

La mitigation d'erreurs, une transition vers la correction

Une méthode de mitigation d'erreurs très prisée s'appelle « l'extrapolation à zéro bruit ». « *On fait un premier calcul quantique avec le moins d'erreurs possible,* explique Thomas Ayral, ingénieur de recherche chez Eviden (groupe Atos). *Ensuite, on augmente artificiellement le bruit, c'est-à-dire la quantité d'erreurs de l'ordinateur quantique et on refait le même calcul. On réitère cette manipulation plusieurs fois, en augmentant toujours un peu plus le bruit, et on obtient une courbe avec tous les résultats. Enfin, on extrapole cette courbe vers la partie que nous n'avons pas, celle qui tend vers la limite zéro bruit (sans erreur), et on espère trouver ainsi un résultat quasi exact.* »



IONQ

La technologie des qubits à base d'ions piégés, comme celle de IonQ, permet de développer des nouveaux codes correcteurs d'erreurs.

Aujourd'hui, toutes les entreprises disposant d'un ordinateur quantique utilisent la mitigation. Mais cette solution n'est pas toujours rigoureuse mathématiquement. *« C'est une sorte de bricolage,* affirme Thomas Ayral. *Elle peut fonctionner, mais nous n'avons pas de garanties, contrairement à la correction d'erreurs où il y a une base théorique solide. »*

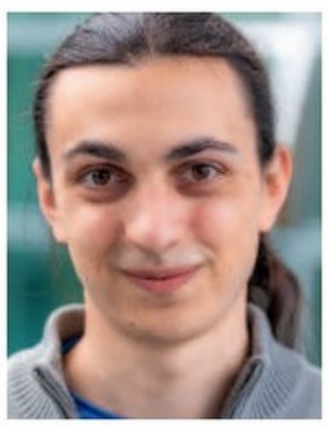
Au fil des progrès, les ordinateurs quantiques sont capables de faire des calculs avec un nombre d'opérations de plus en plus important. Or *« la mitigation d'erreurs a un coût qui augmente de façon exponentielle avec la taille du circuit* [nombre de portes logiques, lire p. 36] *qu'on fait tourner »*, précise Nicolas Delfosse. Autrement dit, un jour ou l'autre, le temps de calcul pour mitiger les erreurs explosera. En attendant, les recherches dans ce domaine se poursuivent. *« On voit beaucoup la mitigation comme une transition vers la correction d'erreurs. C'est probable, mais l'ordinateur tolérant aux fautes est encore loin. En attendant, ça a du sens de voir jusqu'où on peut aller en mitigeant les erreurs »*, remarque Valentin Savin, chercheur au CEA-Leti de Grenoble.

Malgré tout, l'ordinateur tolérant aux fautes grâce à la correction d'erreurs reste le graal de l'ordinateur quantique. *« Contrairement à ce qu'on peut faire avec la mitigation, nous avons des preuves théoriques que les ordinateurs tolérants aux fautes résolvent certains problèmes plus rapidement qu'un ordinateur classique »*, détaille Christophe Vuillot, chargé de recherche à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria) de Nancy. Son principe ressemble un peu à celui d'une partie de Monopoly, où les joueurs cherchent à combiner des maisons pour obtenir des hôtels, car ils sont plus rentables. Dans un ordinateur quantique, on combine des qubits pour former une entité plus robuste : le qubit logique. Mais il y a plusieurs manières de combiner les qubits. Aussi faut-il déterminer le schéma parfait pour qu'un minimum de qubits permettent de corriger un maximum d'erreurs.

Des codes moins gourmands en qubits

Un code à l'architecture assez simple a longtemps dominé les débats : le code de surface. Mais avec lui, il faut environ mille qubits pour faire un qubit logique suffisamment fiable, ce qui est trop coûteux. Les meilleures machines atteignent à peine la centaine de qubits aujourd'hui. *« Il y a une dizaine d'années, il a été prouvé de manière théorique qu'une famille de codes — les codes LDPC (low density parity check) — était optimale »*, assure Nicolas Delfosse. Ces codes sont moins gourmands en qubits, mais leur mise en place nécessite que des qubits éloignés interagissent — et non des qubits voisins comme avec les codes de surface. La technologie des ordinateurs quantiques d'IBM ou de Google, les supraconducteurs, rend quasi impossible ces liens entre qubits éloignés. En revanche, de plus en plus de technologies le permettent. C'est le cas notamment des puces quantiques à ions piégés, privilégiées par IonQ, ou de celles aux atomes neutres prisées par la jeune pousse française Pasqal.

Dans la course entre différentes technologies de qubits, les impératifs dictés par les codes correcteurs d'erreurs pourraient bien constituer le juge de paix entre toutes. ■ **L. D.**



NICOLAS DOHR

« Les ordinateurs tolérants aux fautes résolvent certains problèmes plus rapidement qu'un ordinateur classique »

Christophe Vuillot, chargé de recherche à l'Inria de Nancy

ALAIN ASPECT
PRIX NOBEL DE PHYSIQUE 2022

« La recherche avance vite grâce aux start-up »

Le grand spécialiste de la physique quantique explique comment une collaboration étroite entre les start-up françaises et le monde de la recherche fondamentale accélère le développement de l'ordinateur quantique.

Plusieurs technologies sont explorées pour fabriquer des qubits. Ne vaudrait-il pas mieux concentrer les forces sur une seule ?
Non, car nous sommes loin d'être suffisamment avancés pour prédire laquelle émergera par rapport aux autres. Aujourd'hui, chacune a ses avantages et ses inconvénients. Le type de qubit qu'on utilisera dépendra sans doute de ce que l'on voudra faire. Par exemple, les photons sont très bons pour transporter l'information quantique, mais certainement pas pour la stocker.

Vous êtes passé de la recherche fondamentale à la cofondation d'une start-up, est-ce quelque chose que vous encouragez ?
Je n'ai jamais fait de la recherche fondamentale autrement qu'en étant convaincu qu'il fallait encourager ses applications. Mais si mon esprit est plutôt bien tourné pour la recherche, je ne suis pas doué pour les applications. J'ai donc toujours dit à mes étudiants : *« Si vous avez de bonnes idées, lancez-vous sans hésiter. »* Parmi les gens qui ont fondé Pasqal, plusieurs sont de mes anciens thésards. Ils m'ont demandé naturellement ce que j'en pensais, et si je voulais les aider en participant à la fondation. J'ai accepté, et c'est un plaisir de voir comment une start-up se développe, progresse…

BIO EXPRESS

- **1947** Naissance à Agen (Lot-et-Garonne).
- **1982** Effectue des expériences clés prouvant que les particules peuvent instantanément interagir à distance.
- **2019** Médaille d'or du CNRS.
- **2022** Prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'intrication quantique.

Quel est votre rôle au sein de Pasqal et des autres start-up dans lesquelles vous êtes impliqué ?
Je suis là pour le plaisir d'observer une activité différente de celles qui ont émaillé ma vie professionnelle, et éventuellement pour faire des commentaires du point de vue du scientifique. Dans le même esprit, j'ai accepté d'être dans les conseils scientifiques de plusieurs start-up : Pasqal, Quandela ou Welinq. Je me limite bien sûr aux techniques en lien avec les sujets que je connais : les photons et les atomes ultrafroids.

Comment maintient-on le lien entre recherche fondamentale et start-up ?
Pasqal s'appuie en permanence sur les avancées de la recherche fondamentale. L'un de ses fondateurs, Antoine Browaeys, a un pied dans la recherche au plus haut niveau mondial et un autre dans Pasqal. D'ailleurs, le point de départ de Pasqal est de fabriquer une machine fiable qui réplique la manip de recherche d'Antoine Browaeys. La différence, c'est qu'une manip est constamment à la limite : elle tombe en panne et il faut des experts pour la faire fonctionner. Le but d'une start-up est de rendre tout cela fiable.

Quel rôle jouent les start-up dans cet univers concurrentiel où il y a aussi des géants du domaine comme Google ou IBM ?
Il n'y a pas de guerre entre les grandes entreprises et les start-up. Les premières regardent de près ce que font les secondes, car ces dernières sont agiles.

JOËL SAGET / AFP

« Construire un ordinateur quantique fiable est tellement difficile que si l'on ne s'y met pas ensemble, on n'y arrivera jamais »

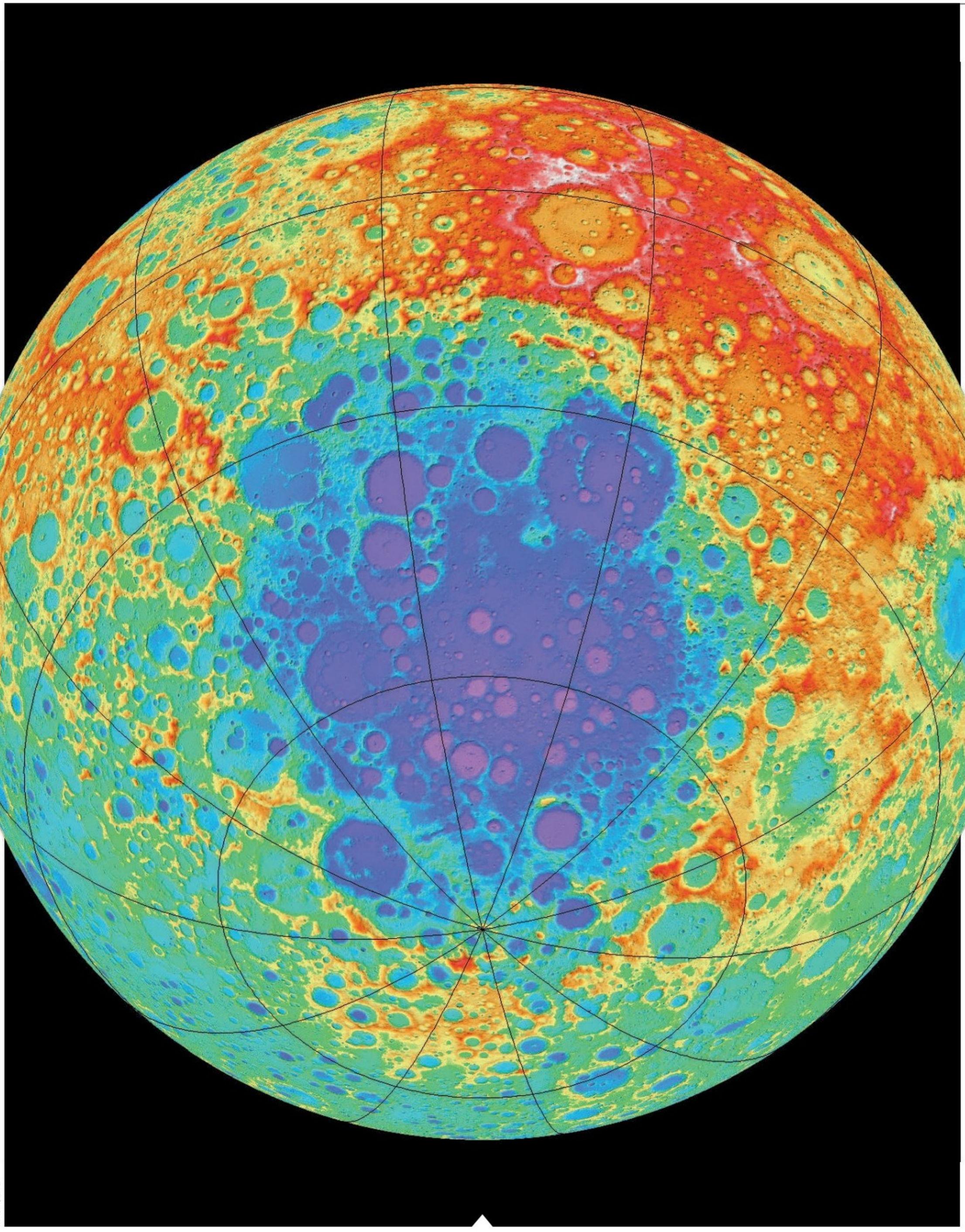
Si ça ne marche pas, elles se plantent. Sinon, les grandes entreprises font des offres pour récupérer ce qu'elles ont développé.

Il n'y a pas de guerre, mais tout de même une forte compétition internationale...
Tous les pays veulent être sûrs d'avoir chez eux les experts des nouvelles technologies quantiques car ils pensent — à tort ou à raison, l'avenir le dira — que ces technologies sont stratégiques. Et que s'ils n'en disposent pas, ils seront à la traîne des autres.
En Europe, nous avons la chance d'avoir des programmes qui permettent des collaborations sérieuses entre divers laboratoires européens. Cela dit, il y a une compétition que je pourrais qualifier de sévère, mais généralement loyale avec les laboratoires américains. La recherche fondamentale est faite par des gens qui se connaissent. Nous sommes en compétition parce que nous aimons bien être les premiers, mais il y a un échange permanent. Les gens qui sont vraiment à la pointe, comme Antoine Browaeys ou Mikhail Lukin à Harvard [Cambridge, États-Unis], savent que construire un ordinateur quantique fiable est tellement difficile que si l'on ne s'y met pas ensemble, on n'y arrivera jamais. Aujourd'hui, le problème principal n'est pas la concurrence, c'est la difficulté de concevoir et réaliser un ordinateur quantique vraiment performant.

Cela se produit-il plus vite que vous ne l'avez imaginé ?
Oui, car le fonctionnement de la société et des entreprises est un peu différent d'il y a vingt ou quarante ans. Les très grandes entreprises comme Thales ou les Bell Labs aux États-Unis avaient leurs propres laboratoires de recherche fondamentale. Aujourd'hui, elles sont moins enclines à faire ce type de recherches, donc elles collaborent autant que possible avec les universitaires et les start-up créées par ces universitaires. D'où la vitesse à laquelle se développe la recherche autour de l'ordinateur quantique.
De plus, des banques comme le Crédit agricole, avec qui Pasqal collabore, n'auraient jamais fait de la recherche sur l'ordinateur quantique. Leur but est de ne pas rater le train, au cas où l'ordinateur quantique pourrait leur servir à quelque chose. Beaucoup de gens qui n'ont pas de compétences en quantique, ni vocation à en acquérir, veulent quand même y investir un peu. Un peu comme au poker, ils misent « pour voir ». Ils ont raison. Cela présente un gros intérêt pour les start-up, qui découvrent grâce à cela de véritables cas d'usage pour l'ordinateur quantique.

Lorsque vous avez mené vos travaux il y a quelques décennies, vous imaginiez-vous que cela mènerait à tout cela ?
Absolument pas. J'avais même totalement abandonné toute réflexion sur l'intrication puisque j'étais passé au travail sur le refroidissement d'atomes par laser dans le groupe de Claude Cohen-Tannoudji [prix Nobel de physique 1997] avec Jean Dalibard et Christophe Salomon. Donc pour moi, en 1985-1986, c'en était fini des photons et de leur intrication. J'étais fier du résultat que j'avais établi et j'étais passé à autre chose. Ce n'est que vers la fin des années 1980 qu'Artur Ekert est venu me parler de la méthode qu'il avait inventée pour faire de la cryptographie quantique en utilisant, comme il m'a dit, « *mes* » photons intriqués ! Alors là je suis tombé de ma chaise, c'était la première application dont j'entendais parler, et je ne l'avais absolument pas prévue. ■

Propos recueillis par É.-O. E.



NASA, LRO

Carte topographique de la Lune orientée vers le sud de sa face « arrière », invisible depuis la Terre. En bleu, l'immense bassin pôle Sud-Aitken où la mission chinoise s'est posée et a recueilli les échantillons que des chercheurs du monde entier commencent à analyser.

La face cachée de la Lune sort de l'ombre

La mission chinoise Chang'e 6 a rapporté près de 2 kg de roches prélevés sur la face de notre satellite naturel qui demeure toujours du côté opposé à la Terre. Les planétologues espèrent avoir une vision plus complète de l'histoire et de la géologie de l'astre sélène et comprendre enfin l'asymétrie entre ses deux hémisphères.

Par Franck Daninos

Ce sont donc 1935 grammes de roches et de fines poussières que la mission chinoise Chang'e 6 a rapportés en juin de la Lune. Une nouvelle prouesse du programme d'exploration lunaire de la Chine, qui depuis 2007 a réalisé quasiment un sans-faute pour placer ses engins spatiaux autour de l'astre sélène, faire alunir ses sondes robotisées et collecter des échantillons. « *Cette suite de succès, tout à fait exceptionnelle, témoigne des remarquables capacités de la Chine dans le développement et la maîtrise des technologies spatiales* », salue Francis Rocard, responsable du programme d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiales (Cnes). Mais les morceaux de Lune collectés par Chang'e 6 présentent cette fois un immense intérêt scientifique. Ils ont été recueillis sur la face cachée de notre satellite naturel : celle qui demeure en permanence du côté opposé à la Terre et reste encore très énigmatique. « *Jusqu'à présent, seuls des fragments de la face visible avaient pu être rapportés par les programmes américain Apollo et soviétique Luna il y a une cinquantaine d'années et en 2020 par la sonde chinoise Chang'e 5* », rappelle Francis Rocard. C'est donc une grande première ! Grâce à ce butin inédit, les planétologues espèrent avoir une vision plus complète de l'histoire et de la géologie de la Lune. Et comprendre, en particulier, pourquoi les faces visible et cachée sont si différentes, l'une ▸

CNSA / AFP

La sonde spatiale
Chang'e 6 posée sur le sol lunaire, le 3 juin.

Les différences notables, notamment de relief et de composition, entre la face visible (à gauche) et la face cachée (à droite) restent pour l'instant inexpliquées.

NASA LRO / JATAN MEHTA

apparaissant plutôt lisse et emplie de « mers lunaires » de couleur sombre, tandis que l'autre, beaucoup plus claire et couverte de hauts-reliefs, en est quasiment dépourvue.

Une face cachée beaucoup plus cratérisée et accidentée

L'un des principaux apports des échantillons d'Apollo et de Luna a été d'établir le scénario actuel sur la naissance de la Lune. En comparant leur composition avec celle des roches terrestres, les chercheurs ont en effet découvert de remarquables similitudes, qui ne peuvent s'expliquer que par une origine commune. Peu après la formation du Système solaire il y a 4,5 milliards d'années, une protoplanète de la taille de Mars aurait ainsi percuté l'ancêtre de la Terre, soutient la théorie de « l'impact géant ». Cette collision cataclysmique aurait fait fusionner l'impacteur avec le manteau terrestre tout en éjectant une partie de ce mélange chaud dans l'espace. Le nuage de débris se serait ensuite refroidi et progressivement aggloméré pour former la Lune.

Ce nouveau compagnon céleste devait être d'abord très proche : l'équivalent de cinq rayons terrestres, mettent en exergue les modèles, contre 60 aujourd'hui. Les forces d'attraction gravitationnelle s'exerçant à la surface des deux astres, appelées aussi « effets de marée », étaient ainsi beaucoup plus fortes. Or, ce jeu d'interaction a peu à peu ralenti la vitesse de rotation de la Lune autour de son axe. Jusqu'à atteindre, au bout de quelques dizaines de millions d'années, un point d'équilibre où *« la période de rotation de la Lune s'est synchronisée à la période de révolution autour de la Terre, soit environ 29,5 jours »*, pose Francis Rocard. Et c'est parce que la Lune danse autour de notre planète au même rythme qu'elle pivote sur elle-même qu'elle présente toujours le même visage.

Si cette face visible nous est par définition familière, il faudra attendre le début de l'ère spatiale pour que l'autre moitié se dévoile. En 1959 plus précisément, lorsque la sonde Luna 3 réalisa les premières photographies de la face « arrière ». *« La surprise fut alors de taille »*, signale Francis Rocard. Car même si ces clichés étaient de piètre qualité, ils révélèrent une quasi-absence de ces mers lunaires — en réalité des plaines basaltiques issues d'anciennes coulées de lave — si caractéristiques de la face visible. Sur cette dernière, les épanchements volcaniques recouvrent ainsi *« 31 % de la surface, mais seulement 1 % pour la face cachée »*, détaille Adrien Broquet, géophysicien au Centre aérospatial allemand. Dans les années 1960, les images plus nettes et les altimètres laser des missions Apollo révélèrent, par ailleurs, que la face cachée était beaucoup plus accidentée et cratérisée. *« L'autre côté ressemble à ces tas de sable avec lesquels mes enfants jouaient autrefois. Tout est comme détruit. Il n'y a pas de mots pour le décrire, juste beaucoup de bosses et de trous »*, témoigna en 1968 l'astronaute américain William Anders d'Apollo 8, premier humain à poser ses yeux sur ce monde tourmenté.

Une croûte lunaire trois fois plus épaisse

Mais les planétologues n'étaient pas au bout de leur étonnement. Grâce aux mesures réalisées sur les échantillons Apollo puis par différents orbiteurs, tel Lunar Prospector lancé en 1998 par la Nasa, ils constatèrent qu'une vaste portion de la face visible était particulièrement enrichie en éléments radioactifs (uranium, thorium, potassium…), notamment au niveau d'une gigantesque

RESSOURCE

L'attrait de l'eau du pôle sud

Le bassin pôle Sud-Aitken, où la mission Chang'e 6 a prélevé des échantillons, captive les astronomes pour plusieurs raisons. D'abord parce qu'il se situe sur la face cachée de notre satellite naturel, dans l'une des rares zones de cet hémisphère ayant connu une activité volcanique. Ensuite parce que ce bassin d'impact est tout proche du pôle sud, où les agences spatiales américaine, européenne et chinoise projettent de construire des bases habitées. *« Les régions polaires recèlent des quantités significatives d'eau gelée »*, précise le cosmochimiste Frédéric Moynier, une ressource essentielle pour abreuver des astronautes, extraire de l'oxygène ou fabriquer du carburant. En fournissant de précieuses informations sur le type et les quantités d'eau disponible au pôle sud, les échantillons de Chang'e 6 pourraient donner ainsi *« une longueur d'avance à la Chine pour ses projets de base lunaire »*, signale le chercheur.

mer lunaire appelée « océan des Tempêtes ». *« Les concentrations y seraient des dizaines de fois plus importantes que sur la face cachée »*, note Adrien Broquet. Enfin, en 2012, en analysant très précisément le champ de gravité sur l'ensemble de la Lune, les sondes américaines Grail établirent une autre particularité majeure : du côté caché, la croûte atteint 60 à 80 km d'épaisseur, contre seulement 20 à 30 km du côté visible.

Trancher entre les hypothèses sur la formation lunaire

Comment expliquer toutes ces différences ? Et assembler les pièces du puzzle pour rendre compte de cette dichotomie entre les deux hémisphères de la Lune ? Sur la face visible, de plus fortes abondances en éléments radioactifs auraient certes produit davantage de chaleur, favorisant ainsi la fusion des roches et les phénomènes magmatiques. Les laves auraient percé en outre plus facilement une croûte moins épaisse, avant de s'écouler en surface, emplir les terrains ravinés et lisser en quelque sorte les reliefs. Mais les processus qui auraient engendré de telles disparités sur les éléments radioactifs et l'épaisseur de la croûte restent à ce jour mystérieux. *« C'est l'une des énigmes les plus tenaces concernant l'évolution géologique de la Lune,* reconnaît Frédéric Moynier de l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP). *Plusieurs hypothèses ont été proposées au cours des dernières décennies et nous espérons que les échantillons de Chang'e 6 permettront enfin de trancher. »* L'une des plus anciennes invoque un mécanisme endogène. De manière fortuite, une petite perturbation dans les mouvements de convection du manteau lunaire aurait pu en effet s'amplifier jusqu'à engendrer un gigantesque panache mantellique sous la face visible. Il aurait ainsi érodé la croûte et favorisé localement la production de laves naturellement enrichies en éléments radioactifs. *« En jouant sur certains paramètres, les simulations numériques indiquent qu'un tel scénario aurait pu se produire »*, relève Adrien Broquet.

JIN LIWANG / XINHUA / AFP

Les chercheurs chinois s'apprêtent à peser les échantillons récupérés dans la capsule (à gauche) qui a atterri en Mongolie intérieure le 25 juin.

Il y a une dizaine d'années, des géologues de l'université de Californie (États-Unis) ont formulé une autre hypothèse, très audacieuse : ce ne seraient pas une mais deux lunes qui se seraient agrégées après l'impact géant ! Alors que la plus grosse serait devenue notre satellite naturel, l'autre (deux fois plus petite et instable) s'y serait écrasée au bout de quelques millions d'années, au niveau de la face cachée, d'où cette croûte plus épaisse.

Avec ses collègues de l'IPGP, Frédéric Moynier privilégie un autre phénomène. Il suppose que l'asymétrie entre les deux hémisphères de la Lune serait apparue lorsque celle-ci était encore une boule de magma en fusion (plus de 1200 °C en surface) très proche de la Terre. Les éléments les plus volatils comme l'eau et certains métaux tel le potassium se trouvaient ainsi à l'état ▶

IPGP

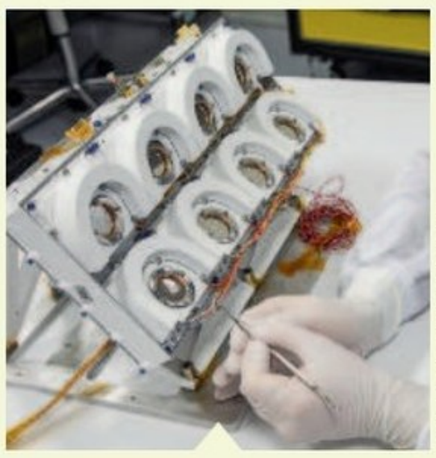
« La disparité entre les deux faces est l'une des énigmes les plus tenaces concernant l'évolution géologique de la Lune »

Frédéric Moynier, cosmochimiste à l'Institut de physique du globe de Paris

MESURES

Un instrument français sur la Lune

La sonde Chang'e 6 embarquait avec elle quatre instruments non chinois : un réflecteur laser italien, un capteur d'ions suédois, un nanosatellite pakistanais et le détecteur Dorn (Detection of outgassing radon), premier instrument français actif à la surface de la Lune depuis un demi-siècle. Conçu par l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse sous la maîtrise d'ouvrage du Cnes, Dorn a mesuré la quantité de radon, un gaz rare radioactif issu de la désintégration des atomes d'uranium présents dans les roches lunaires. « *C'est la première fois que ce type d'instrument est déployé sur la Lune* », se réjouit l'astrophysicien Francis Rocard. Grâce à lui, les scientifiques étudieront la teneur en uranium près de l'atterrisseur, mais aussi les phénomènes de dégazage (de vapeur d'eau notamment) et la dynamique de la très fine atmosphère lunaire. « *Le détecteur Dorn, qui a fonctionné pendant 19 heures, n'est certes qu'un démonstrateur* », précise l'expert. Une fois analysées, ses données permettront de construire une version plus perfectionnée recueillant des informations pendant plusieurs mois, « *peut-être sur la mission Chang'e 8 qui doit être lancée en 2028* », confie-t-il.



CNES/FRÉDÉRIC MALIGNE

Le détecteur Dorn mesure la quantité de radon, un gaz radioactif à la surface de la Lune.

▸ de vapeur. « *Mais les forces de marées, très intenses, auraient davantage attiré et extirpé ceux de la face visible vers la Terre, les autres retombant préférentiellement sur la face cachée au fur et à mesure du refroidissement* », avance Frédéric Moynier.

Évoquons enfin la théorie développée depuis deux ans par Adrien Broquet et d'autres chercheurs internationaux. Elle combine des processus exogène et endogène. Et confère un rôle décisif à l'impact d'un astéroïde ayant créé, il y a environ 4 milliards d'années, le bassin pôle Sud-Aitken, l'une des plus grandes structures de ce type du Système solaire, qui mesure 2500 km de large et se situe à la fois au niveau du pôle sud et de la face cachée *(lire aussi l'encadré p. 44)*. « *Les simulations numériques montrent que cet impact, d'une violence phénoménale, aurait modifié considérablement les mouvements de convection à l'intérieur de la Lune en entraînant notamment une migration des éléments radioactifs,* expose Adrien Broquet. *Ceux-ci se seraient concentrés ainsi à l'antipode du point d'impact, région où se trouvent précisément de nombreuses mers lunaires, dont l'océan des Tempêtes.* »

Repenser la manière dont notre satellite a été créé

Or, c'est dans le bassin pôle Sud-Aitken que la sonde Chang'e 6 s'est posée pour prélever des échantillons : en surface, à l'aide d'un bras mécanique, et jusqu'à 2 mètres de profondeur au moyen d'une foreuse. Dans les mois et les années qui viennent, ils seront soumis à une batterie d'analyses par des scientifiques chinois et internationaux, dont Frédéric Moynier qui « *compte se rendre à Pékin fin octobre* ». Pas à pas, les chercheurs détermineront la composition chimique, en éléments radioactifs et en éléments volatils de ces morceaux de roches, qui, selon les mesures satellitaires, pourraient contenir des fragments de basaltes. « *L'impact qui a façonné le bassin pôle Sud-Aitken a été tellement violent qu'il a pu percer la croûte et excaver des roches mantelliques. Avec un peu de chance, on décèlera donc peut-être également quelques milligrammes de manteau lunaire dans les échantillons de Chang'e 6* », trépigne Francis Rocard, ce qui permettrait d'estimer beaucoup plus précisément la composition globale de la Lune et contraindre les modèles de formation. « *Ce que l'on sait de notre satellite naturel provient essentiellement des échantillons de la face visible,* insiste Frédéric Moynier. *Les fragments de Chang'e 6 pourraient ainsi, non seulement dévoiler l'origine de la dichotomie lunaire, mais nous obliger à repenser aussi la manière dont la Lune a été créée.* » ■

C.PEUS CNES

« Avec un peu de chance, on décèlera quelques milligrammes de manteau lunaire dans les échantillons de Chang'e 6 »

Francis Rocard, responsable du programme d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiales

CapaPictures / Europe 1

LIBRE DE FAIRE LE TOUR DE L'ACTU

PIERRE DE VILNO

19H - 21H

EUROPE 1 SOIR

Europe 1

La voiture autonome ralentit mais ne cale pas

Une fois de plus, elle ne sera pas la star du Mondial de l'automobile. Pourtant les expérimentations continuent discrètement. Et certains robotaxis ou véhicules haut de gamme accumulent les kilomètres en autonomie.

Le 14 novembre 2023, un break Passat entièrement autonome passe la barrière du péage de Fleury-en-Bière, sur l'autoroute A6. Personne, à aucun moment, n'a eu à reprendre le volant. Il fut un temps où ce petit exploit technologique, expérimentation de l'équipementier Valeo et des Autoroutes Paris-Rhin-Rhône (APRR), aurait fait le tour des médias. Or, l'information s'est cantonnée aux sites d'informations spécialisées. La voiture sans conducteur, un temps véritable incarnation de l'intelligence artificielle (IA), semble ne plus fasciner. Moins, en tout cas, que ChatGPT qui monopolise l'actualité du domaine. Ainsi, elle sera à nouveau la grande absente du Mondial de l'automobile, qui se tient à Paris du 14 au 20 octobre. Luc Julia, directeur scientifique chez Renault, a une explication à cette situation : *« Depuis 2014, Elon Musk annonce la voiture autonome pour demain et cela a fini par lasser. Ceux qui travaillent vraiment sur le sujet se sont aperçus que c'était vraiment beaucoup plus compliqué que ce que certains prétendaient.* » Pourtant, elle continue d'avancer, de grimper un à un les différents niveaux d'autonomie *(lire l'encadré ci-contre)*, mais en évitant les annonces fracassantes.

« La rupture entre l'assistance à la conduite et le véhicule automatisé, c'est le niveau 3, explique Antoine Lafay, directeur recherche et développement sur les systèmes d'aide à la conduite chez Valeo. *Or, un petit nombre de voitures, souvent haut de gamme, sont dorénavant homologuées pour conduire en automatique sur autoroute.* » Les Mercedes classe S et EQS, notamment. Ou la Honda Legend (uniquement au Japon). En France, la réglementation autorise ce type de véhicule depuis septembre 2022 sur autoroute, jusqu'à 60 km/h en situation d'embouteillage. À mesure que les lidars gagnent en portée (200 mètres pour la 3e génération de celui de Valeo), il sera possible d'augmenter la vitesse autorisée des voitures autonomes. Mais quoi qu'il en soit, le conducteur doit pouvoir à tout moment reprendre le contrôle. Notamment quand il y a un changement de contexte routier, comme au passage d'un péage. D'où le projet avec APRR, qui visait à éviter une rupture dans l'autonomie.

Autorisés en France depuis 2022 sous certaines conditions, les véhicules autonomes s'appuient sur des instruments habituels (radar, lidar, caméras) auxquels s'ajoute l'intelligence artificielle (ici un robotaxi Waymo aux États-Unis).

MARIO TAMA / GETTY IMAGES / AFP

La voiture était dotée des instruments habituels (radar, lidar, caméras), le véritable enjeu étant de lui transmettre la cartographie du site. Or, une barrière de péage est un environnement incertain : le marquage au sol disparaît, des voies s'ouvrent et se ferment au fil de la journée, d'autres sont réservées (télépéage, poids lourds), etc. Seul le gestionnaire de l'autoroute détient cette topographie dynamique, stockée sur un serveur de la barrière de péage. Il a donc fallu faire communiquer ce dernier avec la voiture *via* le protocole V2X, dédié aux échanges entre un véhicule et un autre élément ou usager de la route. Le véhicule autonome reçoit ainsi la description du site et l'indication de la voie dans laquelle passer. « *Nous avons fait des essais au cours desquels la voie prévue s'est fermée au moment où le véhicule autonome s'engageait, et nous avons réussi à le rerouter en temps réel sur la voie d'à côté* », ajoute Antoine Lafay.

Une autonomie de niveau 4 pour des transports collectifs

L'autonomie de niveau 4 est devenue elle aussi une réalité. Du moins pour des robotaxis et des navettes de transport collectif. Les véhicules n'embarquent personne d'autre que les passagers et sont surveillés à distance pour permettre à quelqu'un d'aller sur place au moindre incident. Waymo (filiale d'Alphabet, maison mère de Google) et Zoox (division d'Amazon) opèrent ce genre de services aux États-Unis *(lire l'encadré p. 50)*.

L'AUTONOMIE DE 0 À 5

Niveau 0
▸ Le conducteur est intégralement en charge de la conduite, avec quelques fonctions automatisées (freinage d'urgence, correction de trajectoire).

Niveau 1
▸ C'est un système d'aide à la conduite : régulateur de vitesse, aide au maintien dans la file, assistance au freinage, etc. Ces fonctions peuvent être désactivées à tout moment.

Niveau 2
▸ Le système peut réguler simultanément le comportement latéral et longitudinal du véhicule mais le conducteur reste en contrôle à tout moment.

Niveau 3
▸ Le conducteur peut laisser le système conduire à sa place et lâcher temporairement le volant mais doit le reprendre dès que nécessaire.

Niveau 4
▸ Autonomie complète dans certains contextes routiers (parking, autoroute).

Niveau 5
▸ Autonomie complète en toutes circonstances, sur toutes les routes ; il n'y a même plus besoin de volant.

ÉTATS-UNIS

Coups d'éclat et coups d'arrêt dans l'autonomie

Présent dans quatre villes des États-Unis, Waymo est l'opérateur de robotaxis le plus avancé, même si sa flotte ne compte que 600 véhicules, loin des 82 000 envisagés en 2018. À Los Angeles, les usagers peuvent s'inscrire sur liste d'attente depuis mars pour rouler sur un axe Santa Monica-Downtown. À Austin, le service est réservé pour l'heure aux employés de la société. Les choses sont beaucoup plus développées à Phoenix, où les véhicules couvrent une vaste zone du centre et de l'est de l'agglomération. Il n'y a plus de liste d'attente depuis 2020. Un cap également franchi à San Francisco depuis juin. Uber, qui espérait se passer un jour de conducteurs, a revendu sa division de recherche sur la conduite autonome fin 2020. Avant de renouer avec le sujet en 2022 au travers d'un partenariat avec Motional, une joint-venture entre Hyundai et l'équipementier automobile Aptiv. Ford et Volkswagen avaient, eux, investi dans Argo AI, censé équiper la société de VTC Lyft en robotaxis de niveau 4 à Miami et à Austin. Argo AI a finalement été dissous en 2022 et Ford a fondé Latitude AI pour se recentrer sur l'autonomie de niveaux 2 et 3 des véhicules de particuliers. Il faut dire que les robotaxis sont encore loin de s'intégrer parfaitement au trafic. La NHTSA, l'agence américaine de la sécurité routière, a ouvert en mai une enquête sur des incidents impliquant ceux de Waymo et de Zoox. Les tests sur route de l'opérateur Cruise ont été suspendus en Californie après qu'un de ses véhicules a percuté une piétonne le 2 octobre 2023 à San Francisco et l'a traînée sur plusieurs mètres, la laissant dans un état grave. Cruise a repris ses tests à Phoenix mais sans passager. Du côté de Tesla, les systèmes Autopilot et Full Self-Driving sont en fait des assistances à la conduite de niveau 2 : les conducteurs ne sont pas censés lâcher le volant.

TAYFUN COSKUN / ANADOLU / AFP

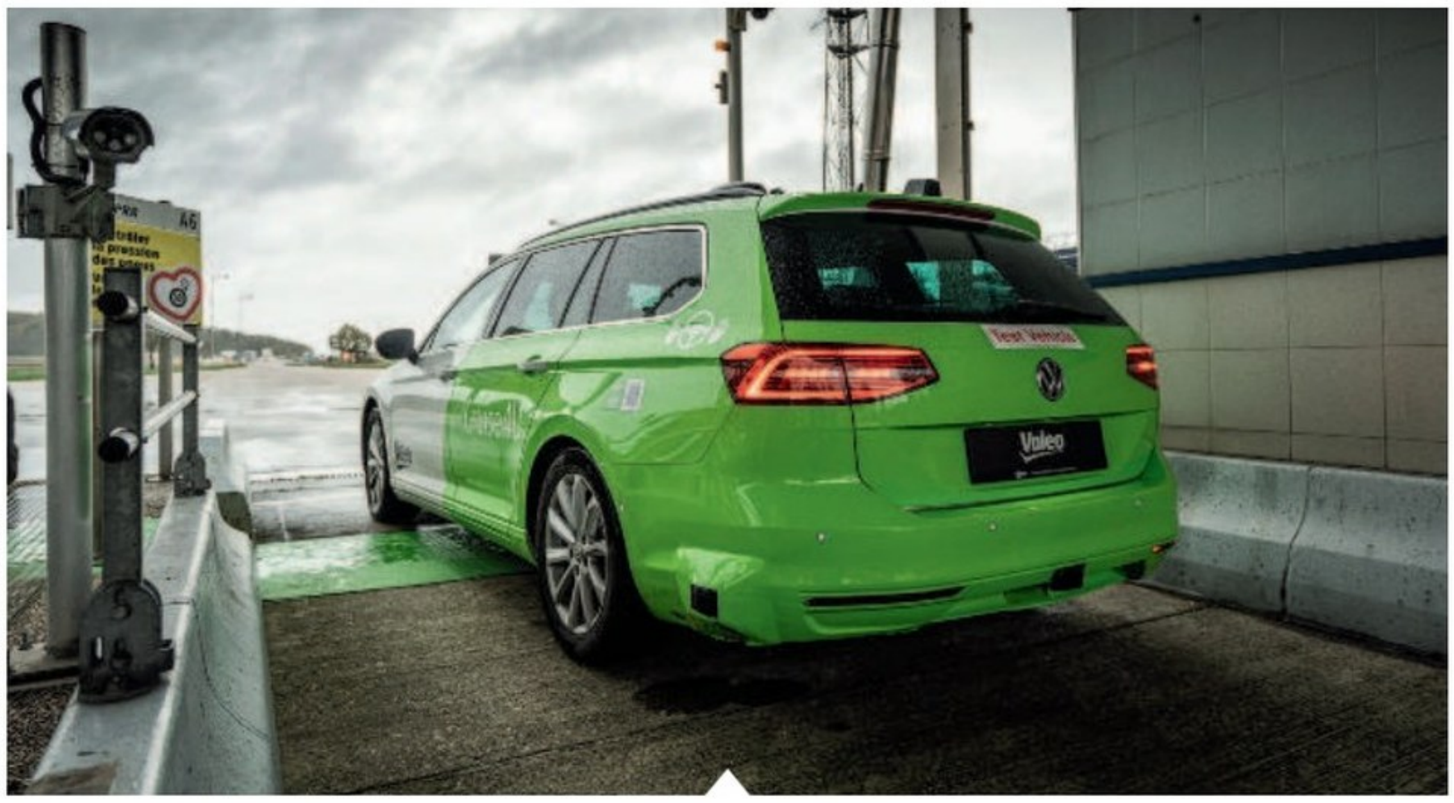
Le robotaxi Zoox d'Amazon (ici en test en mai en Californie) fait l'objet d'une enquête de l'agence américaine de la sécurité routière après de récents incidents.

- L'Europe n'est pas en reste. Les petites navettes autonomes EasyMile circulent par exemple en Belgique, sur le site touristique de Terhills (une ancienne mine) ou en France, à l'Oncopole de Toulouse (l'institut universitaire du cancer). Le prestataire de transports publics Keolis a annoncé la mise en circulation de six navettes à Châteauroux en 2026. Les véhicules sont par ailleurs testés depuis 2019 sur une portion du Centre national de tir sportif, dans la commune voisine de Déols. Ces projets s'inscrivent la plupart du temps dans des périmètres restreints et contraints. « *Ce n'est pas déployable à grande échelle,* précise Luc Julia. *On peut faire du contrôle à distance de mille robotaxis, mais au-delà, c'est plus compliqué.* »

La gestion des données, un élement crucial pour la sécurité

Robotaxi ou voiture particulière, les projets sont en tout cas bel et bien sortis des laboratoires. « *Cela fait presque dix ans que nous travaillons sur le sujet du véhicule autonome, particulier ou transport public, et nous arrivons dans la phase où les innovations recherche et développement peuvent se déployer en industrie et où l'on commence à parler de standardisation* », avance Mohamed Tlig, responsable de l'équipe ingénierie systèmes et sûreté de fonctionnement à l'institut de recherche technologique (IRT) SystemX. Depuis juin, cet ingénieur de recherche pilote avec l'architecte logiciel Erwan Revert les contributions de l'IRT au projet Synergies, financé en partie par la Commission européenne. Ce travail, qui réunit 31 partenaires sur trois ans, porte sur le développement d'une plateforme européenne destinée à améliorer le développement, les tests virtuels et la validation des systèmes de conduite automatisée.

Car si les capteurs sont indispensables au pilotage, les données restent l'élément crucial de ces projets où la sécurité est le maître mot. Quantité d'acteurs disposent ainsi de bases de données



MATTHIEU MÉHEUST - L'ARGUS

Au péage de Fleury-en-Bière (Seine-et-Marne) en novembre 2023, le prototype Cruise4U de l'équipementier Valeo a passé la barrière et repris la route sans intervention humaine.

de natures diverses. *« L'un des enjeux du projet Synergies est de faire en sorte que des constructeurs, des équipementiers, des organismes de régulation, des chercheurs puissent les utiliser,* explique Erwan Revert. *Nous ne cherchons pas forcément à les regrouper, mais à les rendre interopérables pour les rendre exploitables par tout le monde.* »

Il existe ainsi des bases de situations de conduite classique, des bases constituées par le Ceesar (Centre européen d'études de sécurité et d'analyse des risques), qui étudie les accidents, ou par le LAB (Laboratoire d'accidentologie et de biomécanique) sur les situations d'incidents (dites de presque accident). On y trouve, selon les cas, des statistiques, des simulations ou des reconstitutions de scénarios d'accidents ou de situations à risque, des séquences vidéo modélisées et annotées, etc.

« Nous sommes également allés au Japon et en Allemagne pour échanger sur des scénarios d'expertise, ajoute Mohamed Tlig, *c'est-à-dire des cas jugés intéressants par rapport à des fonctions autonomes de niveaux 2 et 3, telles que les systèmes de conduite autonome en embouteillage ou d'aide au maintien dans la voie.* »

Dans le cadre des expérimentations sur route ouverte du projet SAM (Sécurité et acceptabilité de la mobilité autonome) menées en France entre 2019 et 2023, les interactions avec les forces de l'ordre ont aussi été étudiées.

G. LEFAUCONNIER : IRT SYSTEMX

« Nous arrivons dans la phase où les innovations R&D peuvent se déployer en industrie et où l'on parle de standardisation »

Mohamed Tlig, responsable de l'équipe ingénierie systèmes et sûreté de fonctionnement à l'IRT SystemX

Le centre de recherche public-privé Vedecom, spécialisé dans la mobilité, est à l'origine d'une base de données de scènes de conduite collectées directement sur la route, en France et en Europe, par des voitures avec conducteur mais équipées des mêmes capteurs que les véhicules autonomes : 1 million de kilomètres parcourus, quatre millions de cas de figure répartis en plus de 120 classes de scénarios, dans un contexte de chaussée à voies séparées.

Des scénarios variés détectés par l'intelligence artificielle

Baptisé Moove, ce projet définit des scénarios routiers suivant des règles précises : indication d'un début et d'une fin, type de situation à risque rencontrée, comportement du conducteur, vitesse… Avec pour inconvénient de laisser de côté des cas de figure sortant de ce cadre prédéfini. Or, un système de conduite doit être capable de les prendre en compte. D'où une deuxième phase du projet, qui se termine à la fin de l'année. Elle utilise l'intelligence artificielle (IA) pour détecter, à partir des vidéos et données radars, toutes les variabilités d'un scénario. Cela peut concerner la couleur des véhicules impliqués comme la manière dont une voiture change de voie, en passant par les divers comportements et positionnements d'un piéton.

« On n'apprend pas à l'IA à reconnaître une situation mais à identifier plus de choses à partir de ce qui existe déjà, explique Laurent Durville, chef de projet pour Vedecom. *C'est ce qui va nous permettre de basculer vers la conduite autonome en milieu urbain.* » Avec tous les usagers, imprévus et changements brusques de situations qu'une voiture est susceptible de rencontrer en ville, il va falloir sécuriser les systèmes de conduite avec bien plus de données de roulage que sur autoroute. Et personne ne se risque plus à donner une date pour l'introduction de la voiture autonome en plein Paris. ■

Arnaud Devillard

Quand ChatGPT se prend pour un détective privé

Les IA génératives sont conçues pour extraire ou résumer des informations. Mais elles se révèlent également capables de déduire des données personnelles, y compris l'identité d'une personne.

L'avènement des intelligences artificielles (IA) génératives a éveillé des craintes sur les menaces d'espionnage de notre vie privée, grâce à leur capacité à retrouver et catégoriser des informations circulant en ligne. En France, la Commission nationale de l'informatique et des libertés (Cnil) a mis sur pied une équipe pour étudier ce que ces outils font des données personnelles. Plusieurs études ont aussi alerté sur la technique du « prompt injection » (instructions cachées), consistant à formuler un prompt (requête) de manière à obtenir d'un agent conversationnel un comportement déviant, comme lui faire exécuter du code malveillant. Il y a encore plus troublant : ChatGPT et consorts excelleraient à deviner des informations auxquelles ils n'ont pas accès et qui n'ont jamais été mises en ligne ! Des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse) montrent dans un article en prépublication (pas encore revu par les pairs) que ces grands modèles de langage arrivent à induire des informations personnelles, telles que l'endroit où quelqu'un vit ou son sexe, voire à identifier une per-

84,6 %

Le taux de bonnes réponses de GPT-4 quand il lui a été demandé de deviner huit attributs d'une personne (sexe, âge, profession…) à partir de publications sur Reddit.

sonne à partir de publications anonymes.

« Ces intelligences artificielles n'ont pas été entraînées pour inférer des informations personnelles, mais pour connaître beaucoup de choses et pour bien comprendre les textes. Or, ces compétences les rendent très douées pour résumer des informations, voire pour en extraire certaines qui ne sont pas forcément explicites », explique Robin Staab, doctorant en sciences informatiques et coauteur de l'article. Les chercheurs ont mis en évidence cette faculté en demandant à plusieurs versions des modèles GPT (Open AI), Llama (Facebook), Claude (Anthropic) et PaLM (Google) d'analyser des publications sur Reddit, où, contrairement à d'autres réseaux sociaux, les utilisateurs écrivent sous pseudonymes et se sentent protégés par cet anonymat apparent.

« Des informations peuvent être utilisées pour en déduire d'autres, ajoute Márk Vëro, coauteur de l'étude. *C'est parfois facile, par exemple si quelqu'un dit résider près d'une boulangerie en particulier, on peut avoir une idée du lieu où il habite. Mais on peut aussi le faire avec la mention du temps qu'il y faisait à un moment donné. Et des statistiques peuvent aider à inférer des caractéristiques comme le sexe ou le niveau socio-économique : si quelqu'un dit avoir acheté de l'huile de moteur, il est plus probable qu'il s'agisse d'un homme que d'une femme. »*

LE MOT DU MOIS

Prompt injection

Les agents conversationnels tels ChatGPT sont développés de manière à ne pas répondre à certaines requêtes (ou « prompts »), comme expliquer comment fabriquer une bombe ou décoder un captcha (ces suites de caractères à saisir pour prouver qu'on est bien un humain et non un robot avant d'entrer sur un site). Mais ces garde-fous peuvent être contournés par diverses astuces. Par exemple, demander d'écrire des bouts de code informatique « pour aider un ami », en plusieurs prompts. Une fois assemblé correctement, le tout donne un logiciel malveillant. Cette vulnérabilité est appelée « prompt injection » (instructions cachées). Des chercheurs ont montré qu'il est possible d'obtenir ainsi des données personnelles (e-mails, photos) issues des corpus d'entraînement des modèles.

Les chercheurs ont testé cette capacité à inférer sur huit attributs personnels : lieu de résidence, sexe, âge, emploi, lieu de naissance, situation maritale, revenu et niveau d'études. L'IA est parvenue à les deviner 240 fois plus vite que des humains, avec un taux de succès proche de 90 % ! La mention de « Stanley Park » et d'un mécanisme de tarification de transports en commun trahit la ville de Vancouver. Le récit rapide de son parcours scolaire par un internaute permet de déduire qu'il s'agit d'un homme. En racontant son baptême, un autre amène les IA à savoir qu'il vit à Athènes, etc.

5 à 6 attributs suffisent pour nous identifier

« On peut se dire que des millions de personnes ont le même attribut que nous (l'emploi, par exemple), donc qu'il est impossible de nous identifier. Mais ce groupe se réduit à mesure que l'on croise ce premier attribut avec d'autres, prévient Márk Vëro. *Nous sommes des millions avec un même emploi, mais très peu avec cet emploi plus tel lieu de résidence, plus tel niveau d'études, plus tel sexe, plus tel lieu de naissance, etc. »*

Les auteurs estiment que cinq ou six attributs suffisent pour identifier plus de 80 % des adultes américains ! *« Pouvoir faire cette identification de façon automatique change tout notre rapport à la confidentialité en ligne »*, alerte Robin Staab.

Selon les auteurs, obtenir ainsi une identité contient le risque de voir se créer des profils d'utilisateurs frauduleux, notamment si cette information est croisée avec d'autres bases de données. *« On pourrait déduire vos préférences politiques, par exemple, pour vous proposer des publicités très ciblées, ou pour vous identifier si jamais vous vivez dans un pays peu démocratique. Ce procédé pourrait être utilisé pour surveiller le public d'une façon peu onéreuse et très efficace,* martèle-t-il. *Il faut partir du principe que tout ce que l'on poste en ligne pourrait être utilisé pour nous identifier. »* ■

Nicolas Gutierrez C.

POUR EN SAVOIR PLUS

Les vulnérabilités de l'apprentissage automatique et des IA génératives selon le National Institute of Standards and Technology (en anglais) : **sciav.fr/932NIST**

R. STAAB

« Il faut partir du principe que tout ce que l'on poste en ligne pourrait être utilisé pour nous identifier »

Robin Staab, doctorant en sciences informatiques, École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse)

SWIRLY MAGNOLIA / ALAMY/ PHOTO12

Le comportement des animaux a une influence sur leur potentiel de survie. Les plus aventureux (comme ici le faisan) ont davantage de risque de tomber sous le coup d'un fusil, à la différence d'espèces plus casanières.

L'impact inattendu de la chasse sur le gibier

Chaque année, des centaines de milliers d'animaux sauvages sont tués. Des chercheurs sont persuadés que les chasseurs altèrent le patrimoine génétique du gibier qu'ils ciblent. Il est vrai que les exemples d'évolution contrariée sur les bois des cervidés ou sur les défenses des éléphants en Afrique sont troublants.

Par Loïc Chauveau

L'humain n'imprime pas seulement sa marque sur les paysages, les végétaux et les animaux domestiqués. Il modifie également l'évolution des espèces sauvages. Le cas extrême, c'est l'extinction d'une espèce. Au XVII^e siècle, le dodo de l'île Maurice a été éradiqué en quelques décennies, et les 3 à 5 milliards de tourtes voyageuses (*Ectopistes migratorius*) qui peuplaient les grandes plaines de l'Amérique du Nord ont été exterminées au début du XX^e siècle. Mais il y a plus discret. Sans forcément en avoir conscience, les chasseurs qui arpentent cet automne les campagnes et forêts altèrent le patrimoine génétique du gibier qu'ils ciblent. En mars, une équipe de l'Office français de la biodiversité (OFB) s'interrogeait ainsi sur l'impact évolutif de la chasse sur les oiseaux. L'article paru dans *Biological Reviews* ouvre un nouveau champ de recherche. Alors que des centaines de millions d'oiseaux sont tués tous les ans dans le monde, on ne sait rien des conséquences à long terme de ces prélèvements indiscriminés.

Rien en effet ne ressemble plus à un canard qu'un autre canard de la même espèce. « *Pour tout humain, tous les oiseaux se ressemblent et donc le chasseur ne choisit pas son spécimen. Pourtant, chaque oiseau est différent de son congénère* », pose d'emblée Matthieu Guillemain, chef de service à la direction de la recherche et de l'appui scientifique de l'OFB et coauteur de l'article. Le nemrod s'en rend compte lorsqu'il récupère l'oiseau qu'il a tué. Celui-ci est plus ou moins gros, plus ou moins gras et présente ▶

un état de santé différent. Il ne faut donc pas seulement envisager la chasse au travers du nombre d'animaux tués — le tableau de chasse —, mais aussi prendre en compte l'état général des animaux prélevés. Ce qui conduit à se poser une multitude de questions.

La première porte sur l'impact même de la chasse. « *Dans la nature, il arrive qu'il n'y ait pas assez de sites de nidification ou de nourriture disponible, ce qui exclut de la reproduction un certain nombre d'individus,* poursuit Matthieu Guillemain. *Par ailleurs, on constate que certains oiseaux sont de plus faible constitution, ce qui les condamne à plus ou moins brève échéance. Dès lors, éliminer ces oiseaux a des conséquences plus limitées.* » Il a pu constater qu'une partie des sarcelles d'hiver (*Anas crecca*) tuées à la chasse possédaient intrinsèquement des capacités de survie plus faibles que les autres. D'autres chercheurs ont observé une moindre condition physique chez certaines oies des neiges (*Anser caerulescens*) canadiennes, ou chez l'eider commun (*Somateria mollissima*) en Europe.

MATTHIEU GUILLEMAIN

« Des mâles et des femelles en bonne santé sont tués alors qu'ils pouvaient encore se reproduire sur plusieurs saisons »

Matthieu Guillemain, chef de service à la direction de la recherche et de l'appui scientifique de l'Office français de la biodiversité

On peut ainsi imaginer que chasse et mortalité naturelle se recoupent entièrement, le coup de fusil ne faisant qu'anticiper un décès naturel dans les semaines ou les mois qui suivent. « *Les preuves que nous avons montrent que cette compensation totale est cependant rare, et le cas le plus fréquent est qu'elle est partielle, des mâles et des femelles en bonne santé étant tués alors qu'ils pouvaient encore se reproduire sur plusieurs saisons* », note Matthieu Guillemain. L'OFB mène par ailleurs les premières études visant à lier ces différences de potentiel de survie à la manière dont se comportent les sarcelles entre les zones de nourrissage et de repos. Grâce aux bagages d'individus et à l'utilisation de balises satellitaires — une technologie encore très onéreuse —, on commence à entrevoir d'importantes disparités comportementales. Certains individus évitent les espaces les plus dérangés et sont très casaniers, quand d'autres sont beaucoup plus aventureux. Et, donc, potentiellement plus susceptibles de tomber sous le coup d'un fusil. Cette différence de témérité a aussi été constatée chez la truite et, plus près des canards, chez le faisan et la poule pondeuse.

Un changement dans les routes migratoires de certains oiseaux

La réponse évolutive de l'espèce est-elle certaine ? Il faut pour cela que le caractère soit transmissible à travers les générations. Chez certains oiseaux, une telle hérédité a été démontrée pour la longueur des ailes et des pattes, ainsi que la date de départ de la migration. On a ainsi constaté un changement dans les dates et les routes de migration de certaines oies des neiges, qui évitent les chasses de printemps. « *Il est certain que les effets de sélection de la chasse sur les oiseaux ont des conséquences insoupçonnées et méritent un plus grand effort de recherche,* plaide Matthieu Guillemain. *Mais ce ne sera pas chose facile parce que la plupart des populations sont chassées depuis très longtemps, si bien que les oiseaux*

TABLEAU DE CHASSE

Le difficile état des lieux des animaux tués

Connaître le tableau de chasse exact du gros million de chasseurs français relève de la gageure car il dépend presque entièrement de leurs déclarations volontaires. L'ONCFS, ancêtre de l'OFB, s'est risqué deux fois à l'exercice, en 1998 et en 2014. L'évaluation du tableau de chasse de la saison 2012-2013 s'est opérée par téléphone et questionnaire papier auprès d'un échantillon d'environ 15 000 pratiquants. En matière de petite faune sédentaire de plaine, 3 millions de faisans ont été tirés, loin devant le lapin de garenne (1,5 million) et la perdrix rouge (1,3 million) qui est cependant essentiellement issue d'élevages. Pour les petits carnivores, 400 000 renards sont revendiqués, loin devant le blaireau (22 000) et la martre et la fouine (9000). Pour les oiseaux, le pigeon ramier arrive en tête avec 4,9 millions d'individus prélevés, loin devant la famille des grives (500 000). 1,2 million de canards colverts et 370 000 sarcelles d'hiver ont été tués, et la bécasse des bois, avec 730 000 individus abattus, est l'oiseau migrateur le plus recherché. S'agissant du grand gibier, 553 000 chevreuils et 550 000 sangliers ont été tués, loin devant les 57 000 cerfs élaphes, les 12 000 chamois ainsi que les 3000 isards.

PETER CHADWICK/ GETTY IMAGES - DOMINIQUE DELFINO/ HEMIS.FR - DONALD M. JONES / NATUREPL.EBPHOTO

La chasse au trophée a opéré une sélection sexuelle entraînant une diminution de la taille des bois chez le cerf élaphe et des cornes chez le mouflon mâle. Dans le parc Gorongosa, au Mozambique, plus de la moitié des éléphantes d'Afrique sont aujourd'hui dépourvues de défenses en raison d'une mutation génétique très rapide due au braconnage de l'ivoire durant la guerre civile (1977-1992).

actuels pourraient déjà être le fruit de cette sélection. »

L'étude de la pression sélective sur les 65 espèces d'oiseaux que l'on peut tirer dans l'Union européenne (60 en Amérique du Nord) ne fait donc que débuter. Elle s'appuie sur les analyses effectuées sur les ongulés. Là, les constats sont plus simples parce que la chasse est plus sélective. Les chasseurs convoitent en effet les trophées : cornes les plus longues et bois exceptionnels. Or, ce sont des caractères sexuels secondaires, les organes visibles ou la couleur qui permettent de distinguer un mâle d'une femelle en dehors du sexe lui-même. Les prélèvements ont donc une influence directe sur la reproduction en supprimant du cheptel les mâles arborant les plus beaux attributs. Grand spécialiste de l'étude du mouflon d'Amérique (*Ovis canadensis*), Marco Festa-Bianchet, biologiste à l'université de Sherbrooke, au Québec (Canada), a été l'un des premiers à prouver que la chasse au trophée provoquait une sélection sexuelle allant à l'encontre du but recherché : la diminution de la taille des cornes. En tuant en effet les plus beaux mâles, on les exclut de la reproduction. Et ce sont les mâles les moins bien lotis qui en profitent. Les mouflons mâles ont ainsi perdu un tiers de la longueur de leurs cornes en quelques décennies. Marco Festa-Bianchet différencie cependant les espèces dont les cornes poussent vite, comme le chevreuil (*Capreolus capreolus*), la chèvre de montagne (*Oreamnos americanus*) ou le chamois (*Rupicapra rupicapra*), car la taille des attributs joue un moindre rôle dans le succès reproductif. En revanche, le caractère importe davantage pour les espèces dont les cornes poussent lentement et qui assurent un grand rôle dans les combats pour les femelles, comme chez le bouquetin (*Capra ibex*) ou le cerf élaphe (*Cervus elaphus*).

Après vingt-huit ans de patiente observation des différentes populations de mouflons du massif du Caroux-Espinouse, monts les plus méridionaux du Massif central situés dans l'Hérault, les chercheurs de l'Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS, ancêtre de l'OFB) sont arrivés à des résultats similaires.

Comme une partie de ces petites montagnes est interdite à la chasse, les scientifiques ont pu mettre en exergue l'impact de cette pratique. Ils ont ainsi déterminé une forte diminution (-22 %) de la taille des cornes et un resserrement de leur écartement. « *En sélectionnant préférentiellement les animaux aux trophées larges, les chasseurs ont pu augmenter la contribution génétique des animaux dont le trophée est plus serré* », concluent les chercheurs.

Une preuve irréfutable chez l'éléphant d'Afrique

Il s'agit en l'état d'hypothèses, car les analyses génétiques n'ont pas permis de constater des mutations qui signeraient de manière certaine l'impact de la chasse. Ce genre de preuves irréfutables a pu être apporté chez l'éléphant d'Afrique (*Loxodonta africana*). En octobre 2021,

l'article du département d'écologie et de biologie évolutive de l'université de Princeton (États-Unis) paru dans *Science* a fait grand bruit chez les évolutionnistes. Cette équipe avait déjà publié en 2018 une étude montrant que, partout en Afrique australe, la proportion d'éléphants sans défenses croissait. Les chercheurs se sont intéressés aux populations vivant dans le parc national de Gorongosa, au Mozambique. Entre 1977 et 1992, les deux camps se disputant le pouvoir ont financé leur guerre en vendant de l'ivoire. Durant cette période, les troupeaux d'éléphants sont ainsi passés de 2542 individus avant la guerre à 242 en 2000. Premier constat : avant-guerre, 18,5 % des femelles étaient dépourvues de défenses. En 2000, plus de la moitié des jeunes femelles souffraient de cette aplasie dentaire.

Une évolution qui s'est faite en une génération et demie

À partir d'échantillons de sang, les chercheurs ont séquencé le génome entier de 18 femelles, sept avec défenses et 11 sans. Deux gènes baptisés AMELX et MEP1A, dont le rôle est reconnu dans le développement des dents chez les mammifères (dont l'humain), ont présenté de fortes mutations. La rapidité de cette évolution étonne les spécialistes. « *Quarante ans, cela représente une génération et demie pour* Loxodonta africana, précise Régis Debruyne, chercheur spécialiste des pachydermes au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, interrogé après la publication de l'article. *Comment imaginer une évolution aussi rapide chez une espèce à reproduction aussi lente ?* » Il y a vraisemblablement eu une accélération des mutations, car la défense est un caractère sexuel secondaire d'une grande importance chez l'éléphant. Or, le nombre de prétendants a drastiquement diminué avec l'abattage des spécimens les plus spectaculaires. « *Les animaux porteurs de grosses défenses constituent le premier choix des femelles et cela n'a pas changé,* rappelle Régis Debruyne. *L'effet sélectif s'est plutôt opéré sur les femelles, celles ne portant pas de défenses pouvant accéder à la reproduction du fait du massacre de celles en possédant.* » Le mode de vie influe également. Vivant en solitaire, un mâle sans défenses aurait du mal à se nourrir sans cet outil qui permet de fouiller le sol et d'encadrer le travail de la trompe, si bien que ce cas reste très rare. Les femelles vivent, elles, en troupeau où les moins dotées bénéficient de l'aide des mieux pourvues. Par ailleurs, le plus faible nombre de reproductrices a augmenté les risques de consanguinité et accéléré la circulation des mutations des gènes impliqués dans la formation des défenses.

Le cas des éléphants de Gorongosa constitue, à ce jour, la principale preuve génétique de l'impact de la chasse sur les animaux sauvages. Mais les analyses devraient se multiplier et les indices s'accumuler. Pour Matthieu Guillemain et le service scientifique de l'OFB, c'est une véritable enquête au long cours qui débute. ■

PABLO CHIGNARD / DIVERGENCE

RECENSEMENT

Comment compter les animaux sauvages ?

Pour estimer une population sauvage, la méthode utilisée est celle de la « capture-marquage-recapture ». Il s'agit de capturer et de marquer un échantillon représentatif de l'espèce que l'on veut suivre puis de la relâcher très vite pour limiter le stress *(photo)*. D'autres sessions de capture sont organisées à intervalles réguliers, ce qui va permettre de capturer des individus marqués et non marqués. Des analyses statistiques, notamment la proportion d'animaux marqués au moment de la recapture, permettent alors d'évaluer la taille de la population. Ces opérations donnent aussi des informations sur d'autres données démographiques comme la natalité, la mortalité et le taux de survie.

M. CHRISTOPHE/ABACA

« Les femelles ne portant pas de défenses ont pu accéder à la reproduction du fait du massacre de celles en possédant »

Régis Debruyne, chercheur spécialiste des pachydermes au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

Cap sur les côtes albanaises

LES CROISIÈRES DU SAVOIR SCIENCES ET AVENIR

Du 5 au 14 avril 2025

VOS ACCOMPAGNATEURS SCIENCES ET AVENIR

Bruno David
Naturaliste, ancien président du Muséum national d'histoire naturelle, auteur de nombreux livres dont *Le Monde Vivant* avec Guillaume Lecointre (Grasset, 2022).

Claude Sintès
Archéologue, conservateur en chef honoraire du patrimoine, ancien directeur du Musée départemental Arles antique, chercheur associé auprès du CNRS.

Philippe Chalmin
Professeur d'histoire économique à l'université Paris-Dauphine, président fondateur de CyclOpe, le principal institut de recherche européen sur les marchés des matières premières.

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef de Sciences et Avenir

2025 sera l'année de la mer, avec en point d'orgue la troisième « Cop Océan » qui se tiendra à Nice en juin. Aussi, c'est en compagnie d'éminents spécialistes du monde marin que nous vous proposons de partir cette année en « Croisière du savoir ». Direction : la mer Ionienne et la mer Adriatique. Notre voyage partira d'Athènes pour arriver à Venise. Avec en point d'orgue l'Albanie. Située au carrefour des grandes voies antiques reliant l'Orient et l'Occident, sur la côte occidentale de la péninsule balkanique, l'Albanie est l'un des plus petits pays d'Europe mais qui a hérité d'un riche passé historique. Notre voyage sera l'occasion de découvrir certains de ses trésors antiques, avec des escales à proximité des sites archéologiques majeurs de Butrint, l'antique Bouthrôtos, et d'Apollonia d'Illyrie. Auparavant, nous irons à Corfou, grecque et vénitienne, et par la suite au Monténégro dans le golfe de Kotor, d'une surprenante beauté.
Mais les Croisières du savoir sont avant tout la promesse d'échanges culturels avec des experts scientifiques qui auront plaisir à partager vos émotions. À commencer par la participation exceptionnelle de Bruno David. Sa passion : les échinodermes, mais il possède une connaissance très fine de l'ensemble du monde marin. Il nous parlera des spécificités de la Méditerranée et de la biodiversité qu'elle abrite. Claude Sintès, connu pour avoir dirigé le Musée départemental Arles antique et pour ses fouilles en Lybie, est également un spécialiste de la navigation et de la piraterie dans l'Antiquité. Enfin, Philippe Chalmin, que d'aucuns surnomment le « pape des matières premières », nous racontera comment l'Adriatique a été au cœur du développement des échanges, du commerce international et du capitalisme marchand. *M.N.*

MS Hamburg

Notre croisière se déroulera à bord du « MS Hamburg », un navire à taille humaine n'accueillant pas plus de 380 passagers avec trois espaces de conférences. Il répond aux dernières exigences environnementales sur les carburants, l'échappement et le traitement des déchets. Il est exploité avec du diesel marin à faible teneur en soufre au lieu de l'huile lourde, conformément aux normes ISO actuelles et aux spécifications de MARPOL/OMI. Toutes les eaux usées sont traitées et purifiées avant d'être renvoyées hors du navire en qualité d'eau potable.

À partir de 2 490 €/pers.
en cabine intérieure occupée par 2 personnes, vols internationaux inclus

Jour	Escales	Arrivée	Départ
05/04	Paris / Athènes / Le Pirée (Grèce)	-	23h00
06/04	Nauplie (Grèce)	07h30	18h00
07/04	Katakolon (Grèce)	13h00	18h00
08/04	Corfou (Grèce)	07h00	00h00
09/04	Saranda (Albanie)	07h00	21h00
10/04	Vlore (Albanie)	07h00	23h00
11/04	Durres (Albanie)	07h00	20h00
12/04	Kotor (Montenegro)	07h00	11h30
13/04	Ancone (Italie)	09h00	20h00
14/04	Venise (Italie) / Paris	08h00	

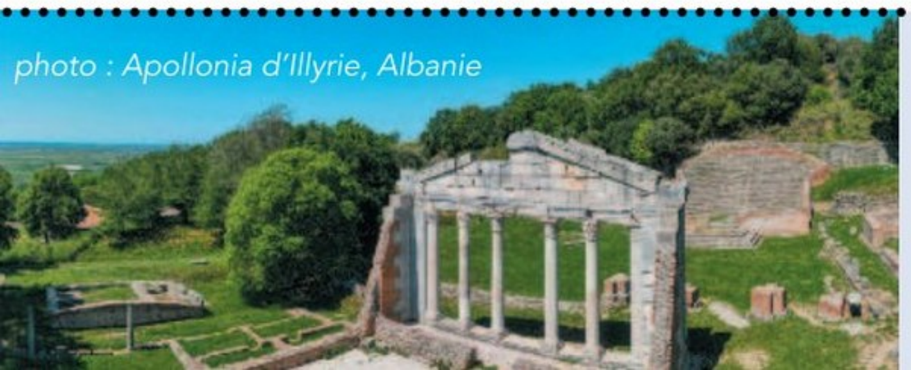


photo : Apollonia d'Illyrie, Albanie

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :

PLEIN CAP « Croisières du Savoir »
CROISIÈRES PLEIN CAP : 251 ROUTE DE LA COLLE - 06270 VILLENEUVE-LOUBET
info@plein-cap.com - www.croisiere-du-savoir.fr - Tél. 04 93 20 21 20

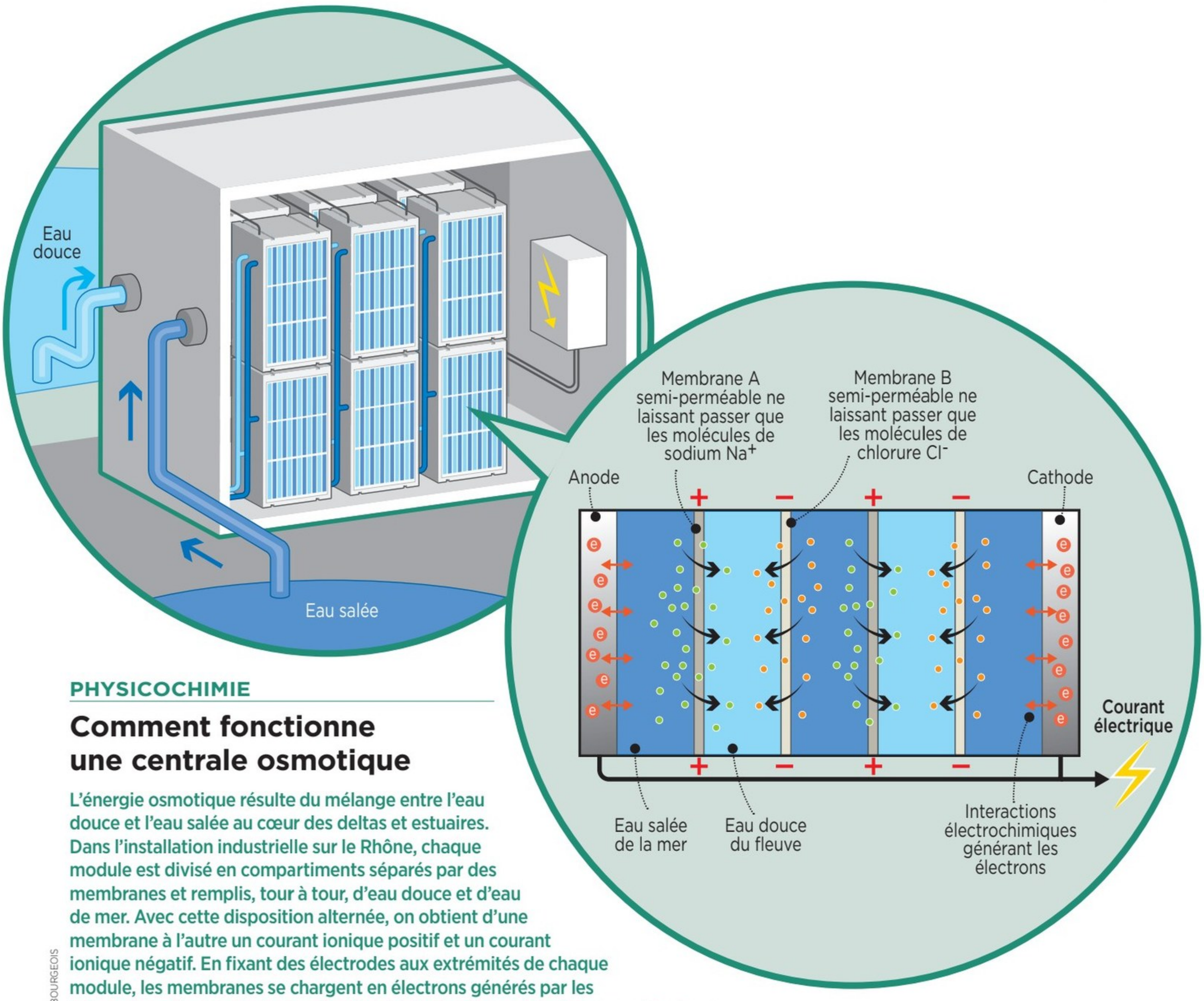
Une énergie renouvelable inédite voit le jour en France

La première centrale osmotique à grande échelle va être inaugurée dans le delta du Rhône. Elle générera de l'électricité grâce aux interactions entre les molécules de sel de la mer et d'eau douce du fleuve. La start-up Sweetch Energy parie sur une technologie innovante pour fournir une énergie à bon marché.

Construit sur l'écluse de Barcarin (Port-Saint-Louis-du-Rhône), le générateur osmotique pourra produire 4 térawattheures par an (vue d'artiste).

SWEETCH ENERGY

C'est en pleine Camargue, à Port-Saint-Louis-du-Rhône, que sera mise en fonction en cette fin 2024 la première centrale osmotique de France. Un projet unique au monde. Il aura fallu moins de dix ans à l'entreprise Sweetch Energy, en collaboration avec la Compagnie nationale du Rhône et EDF Hydro, pour mettre au point ce premier modèle de centrale reposant sur le principe de la diffusion ionique nano-osmotique. Traduit du jargon électrochimique, cela donne une centrale qui peut produire de l'électricité grâce à la rencontre entre l'eau du fleuve et de la mer. Cette station pilote de seulement quelques centaines de mètres carrés, construite sur l'écluse de Barcarin dans le delta du Rhône, pourra générer à elle seule près de 4 térawattheures (TWh) par an. *« Soit de quoi fournir de l'électricité propre et permanente pour près de 2 millions d'habitants, l'équivalent de l'agglomération de Marseille et ses environs »*, annonce Nicolas Heuzé, cofondateur et directeur général de la start-up. À titre de comparaison, un réacteur du parc nucléaire français a produit entre 5 et 6 TWh sur l'année 2023. Avec près de 40 millions d'euros apportés au projet depuis 2017 pour l'ensemble des recherches et des expérimentations, c'est un investissement sans précédent dans l'histoire industrielle de l'énergie osmotique.



BRUNO BOURGEOIS

PHYSICOCHIMIE

Comment fonctionne une centrale osmotique

L'énergie osmotique résulte du mélange entre l'eau douce et l'eau salée au cœur des deltas et estuaires. Dans l'installation industrielle sur le Rhône, chaque module est divisé en compartiments séparés par des membranes et remplis, tour à tour, d'eau douce et d'eau de mer. Avec cette disposition alternée, on obtient d'une membrane à l'autre un courant ionique positif et un courant ionique négatif. En fixant des électrodes aux extrémités de chaque module, les membranes se chargent en électrons générés par les interactions électrochimiques d'un bout à l'autre du module. Le courant ionique devient un courant électrique. On obtient ainsi un gigantesque dispositif de piles en série.

Pour le directeur général de Sweetch Energy, un nouvel horizon s'ouvre sur le marché des énergies renouvelables : *« Si nous investissons les quelque 10 000 plus gros deltas du globe, qui représentent un gisement annuel de 30 000 TWh, l'énergie osmotique peut fournir près de 15 % de l'électricité de la planète d'ici à 2050 ! »* Et de façon entièrement décarbonée, sans transformation d'un combustible. L'énergie osmotique résulte du simple mélange entre l'eau douce et l'eau salée au cœur des deltas et estuaires. Elle est permanente et ne nécessite aucune forme de stockage.

« L'osmose est une diffusion de molécules entre deux milieux de salinités différentes, rappelle Lydéric Bocquet, physicien au CNRS et spécialiste de mécanique des fluides. *De cette rencontre peut résulter une très grande source d'énergie. Ici, elle provient du mélange des ions (atomes chargés positivement ou négativement) du sel contenu dans l'eau de la mer, le sodium (Na^+) et le chlorure (Cl^-) avec l'eau très peu salée du fleuve se jetant dans la mer. On parle d'entropie de mélange. »*

Le procédé paraît si simple qu'on se demande pourquoi il ne s'est pas imposé depuis sa mise au point, dans les années 1950. *« Il y a deux raisons à cela,* explique Lydéric Bocquet. *La première, c'est la concurrence avec le gaz, le charbon, le pétrole, etc., alors qu'il*

PHOTOS : THIERRY PASQUET / SIGNATURES POUR SCIENCES ET AVENIR

Réalisées à partir d'un biopolymère issu de végétaux (à gauche), les membranes semi-perméables (au centre) auront nécessité pour leur mise au point pas moins de 7000 expériences dans les laboratoires de Sweetch Energy, à Rennes. Différents taux de salinité de l'eau sont testés afin de déterminer le plus optimal en vue de produire de l'électricité (à droite).

n'y avait pas encore l'urgence écologique ; quant à nous, en France, nous avions tout misé sur le nucléaire. La deuxième, c'est le coût. » En effet, le premier modèle de centrale osmotique construit en 2009 par les Norvégiens de Statkraft affichait un coût de production du mégawattheure à environ 1000 euros — contre environ 60 à 70 euros pour le nucléaire. Elle ferma ses portes au bout d'à peine quatre ans. Pour baisser la facture, il fallait repenser la technologie.

C'est dans les laboratoires de Sweetch Energy à Rennes, qui font également office de micro-usine, qu'a été conçue une méthode permettant de générer directement de l'électricité à partir des interactions entre les molécules de sel et d'eau, sans passer par une turbine comme dans la solution norvégienne. Le point de départ fut un article de Lydéric Bocquet publié dans la revue *Nature* en 2013 : « *Nous avons injecté de l'eau plus ou moins salée dans des nanotubes en nitrure de bore,* se rappelle-t-il. *Nous avons découvert que, selon la composition chimique du nanotube, le mélange d'eau et de sel produisait un "courant ionique" considérable. L'intensité de ce courant résulte des interactions entre les ions du mélange d'eau salée et le nitrure de bore.* »

Ces découvertes permirent d'envisager de nouvelles voies pour extraire l'énergie osmotique au sein des deltas, là où les flux de cations (les ions sodium Na^+ chargés positivement) et d'anions (les ions chlorure Cl^- chargés négativement) du sel de mer rencontrent les molécules d'eau douce. Un tout nouvel univers électrique qu'il a fallu appréhender, explique Bruno Mottet, cofondateur et directeur scientifique de Sweetch Energy : « *Tout l'enjeu était de savoir comment dégager suffisamment de charges positives d'un côté et de charges négatives de l'autre afin d'obtenir une différence de potentiel, comme pour une simple pile. Et donc être capable de produire de l'électricité.* »

Six années d'expérimentations furent nécessaires pour produire un prototype capable de générer de l'électricité. Quant au module prêt à être industrialisé, il ne fut achevé qu'en 2023. Bruno Mottet explique pourquoi le défi était difficile à relever : « *Pour avoir deux pôles de charge différente et régénérer la pile, il nous fallait trouver une matière qui laisse d'abord passer les ions positifs d'un côté tout en bloquant les ions négatifs. Elle serait alors traversée d'un fort courant ionique positif. Mais elle devait également être facilement trans-*

LE TÉLÉGRAMME/G. BIETRY/MAXPPP

« Nous visons un coût de production du mégawattheure entre 50 et 100 euros pour une électricité propre et disponible en continu »

Nicolas Heuzé, cofondateur et directeur général de la start-up Sweetch Energy

formée en une autre qui, cette fois-ci, laisserait passer les ions négatifs tout en bloquant les ions positifs. Celle-ci serait alors traversée d'un fort courant ionique négatif. C'était tout à fait concevable, sachant que ces deux types d'ions ne possèdent pas la même taille. »

Un biopolymère utilisé dans l'industrie textile

Les ingénieurs ont alors repris l'idée d'une fine membrane semi-perméable permettant le passage de certains ions, développée pour les premières usines de dessalement dans les années 1970. Elle stoppe les molécules de sel mais laisse passer les molécules d'eau. *« Nous nous sommes ensuite inspirés de l'agroalimentaire où l'on utilise des membranes avec des pores de différentes tailles pour laisser passer ou non certaines bactéries et protéines »*, poursuit Bruno Mottet. 7000 expériences plus tard et après avoir testé six matériaux différents, dont l'oxyde de titane et différents oxydes métalliques, la solution est enfin trouvée : un biopolymère issu des parois végétales. *« L'idée nous est venue en étudiant son usage dans le traitement des eaux usées de l'industrie textile. Il absorbait de façon sélective certains colorants et d'autres non. Outre le fait de présenter toutes les qualités requises, il était largement répandu dans la nature, recyclable et très peu coûteux ! »*

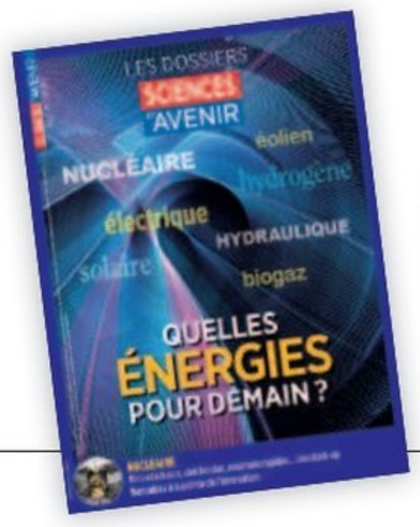
Dans la centrale du delta du Rhône, seront installés plusieurs centaines de modules osmotiques. À l'intérieur de chacun, des centaines de membranes empilées, soit des milliers de mètres carrés de membranes brevetées Inod (Ionic nano osmotic diffusion). *« Grâce aux évolutions rapides de notre technologie et aux effets d'échelle, nous visons un coût de production du mégawattheure entre 50 et 100 euros pour une électricité propre et disponible en continu »*, affirme Nicolas Heuzé. De quoi sérieusement concurrencer le nucléaire ou l'éolien (environ 70 euros/MWh). Avec quels impacts sur la nature ? *« Nous ne modifions pas la composition chimique du delta,* assure Bruno Mottet. *L'eau est intégralement restituée au milieu naturel. Le seul changement serait une baisse de température de quelques dizaines de degrés due à la récupération de l'énergie osmotique. Avec le réchauffement climatique, c'est peut-être un bénéfice supplémentaire ? »*

À l'heure actuelle, il n'existe aucun autre projet de ce type dans le monde, sinon de futures collaborations avec la start-up française en Asie et en Amérique du Nord. *« Nous sommes évidemment très attentifs à la Chine, mais elle n'en est qu'au stade de la recherche universitaire, nous avons plusieurs années d'avance »*, estime Nicolas Heuzé. ■ **Kirill Nikitine**

GENÈSE

L'énergie osmotique, une histoire déjà longue

C'est en 1954 que paraît le premier article scientifique portant sur l'énergie osmotique, signé du Britannique Richard Pattle. Le phénomène d'osmose, par lequel les molécules d'eau sont attirées par les molécules de sel de l'eau de mer, y est décrit comme un potentiel pouvant générer de l'électricité. Au même titre que le débit d'un fleuve ou une chute d'eau convertis en énergie hydraulique. En 1958, les chimistes américains Sydney Loeb et Srinivasa Sourirajan créent la première membrane semi-perméable à l'université de Californie. Un système de séparation qui, au sein d'un phénomène osmotique, s'avère très efficace pour déminéraliser l'eau de mer. En 1975, Sydney Loeb propose un premier modèle de *« centrale électrique osmotique »* dans un article très détaillé. Il avertit cependant sur le coût d'un tel système. Ce n'est qu'en 2009 que la première centrale osmotique à turbine verra le jour en Norvège, confirmant enfin les prévisions de Loeb.



POUR EN SAVOIR PLUS

▸ Découvrez le panorama de la recherche sur les énergies nouvelles dans le dernier numéro des Dossiers de *Sciences et Avenir* **« Quelles énergies pour demain ? »**.

Une anomalie froide trouble l'Atlantique

Un refroidissement localisé de la zone équatoriale de l'océan a fait croire un temps que le phénomène pourrait affaiblir la saison des ouragans. Mais ailleurs, les températures de surface du bassin de l'Atlantique Nord n'ont jamais été aussi élevées.

L'océan Pacifique n'est pas le seul à connaître des anomalies thermiques ayant des répercussions sur le climat : l'Atlantique aussi a son Niño et sa Niña. La National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, centre de prévisions et de recherche, équivalent américain de Météo France) l'a rappelé en émettant, mi-août, un avertissement sur un phénomène climatique en cours. Alors que les eaux de surface de l'ensemble de l'Atlantique Nord jusqu'aux zones arctiques n'ont jamais été aussi chaudes, sa partie équatoriale, située approximativement à équidistance de l'Amérique du Sud et de l'Afrique, a connu un écart de température marqué de près de 1 °C. Un refroidissement intervenu alors que les alizés, ces vents équatoriaux réguliers, sont cette année particulièrement faibles.

Dans ces régions, vents et température de l'eau sont en effet étroitement liés pour former un cycle saisonnier. Les eaux sont plus chaudes au printemps pour descendre autour de 25 °C au cours des mois de juin, juillet et août. Ce refroidissement est lié aux vents qui se renforcent avec le rayonnement solaire. Ils font remonter les eaux chaudes de surface vers le nord et facilitent ainsi leur remplacement par des eaux plus froides venant des couches profondes de l'océan. Pour qu'un phénomène El Niño (réchauffement) ou La Niña (refroidissement) Atlantique puisse être déclaré, il faut que les seuils de 0,5 °C dans un sens ou dans l'autre soient franchis pendant trois mois sur au moins deux années consécutives. Si la NOAA a sonné l'alarme mi-août, c'est que jamais on n'avait enregistré de tels écarts depuis 1982 et les premières mesures de la température de surface dans l'Atlantique. Au printemps dernier, les eaux étaient plus chaudes de 1 °C dans cette zone par rapport à la moyenne des quatre dernières décennies pour atteindre ensuite une anomalie de froid marquée en juin. Une Niña pouvait donc être en formation, ce qui aurait été un événement.

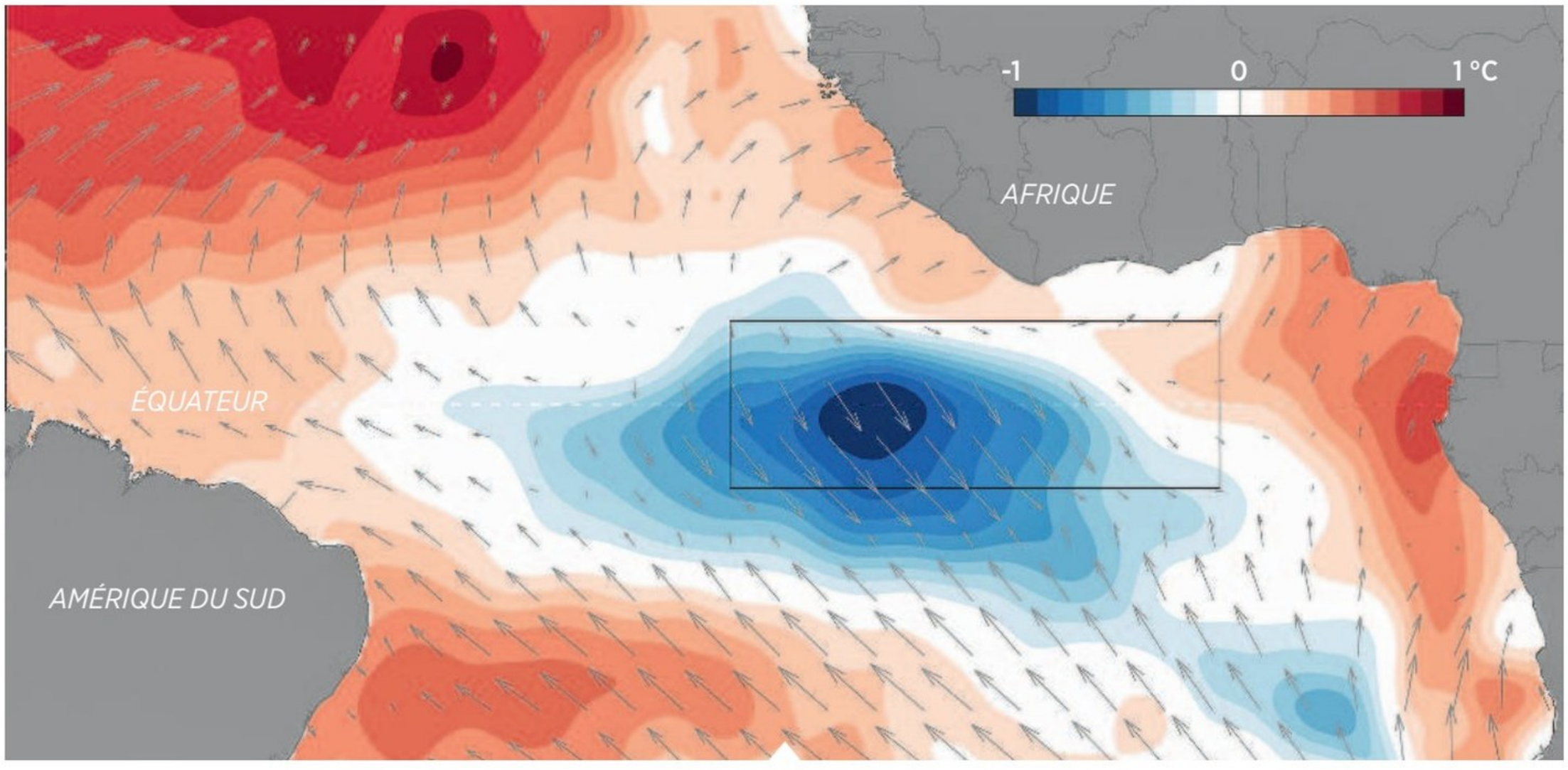
Les Niños de l'Atlantique n'auraient qu'un effet régional

Il n'y a eu aucun Niño depuis 2000 et, au cours de cette période, les seuils pour La Niña n'ont été tutoyés qu'à cinq reprises. Les services de recherche climatique auraient alors mis en œuvre des moyens de vigilance du phénomène. Celui-ci peut en effet affecter la météo régionale. « *Le différentiel de température entre le continent africain et l'océan régit la mousson africaine. La température continentale augmente plus vite que celle des océans, un processus qui induit une migration vers le nord des pluies de la mousson africaine et provoque des orages violents dans les pays du golfe de Guinée,* décrit Davide Faranda, directeur de recherche au Laboratoire des

PRÉVISIONS

Faux espoir pour la saison des ouragans

La NOAA a prédit avec une probabilité de 90 % que la saison des cyclones, qui débute fin août et se termine en novembre, sera plus active que la moyenne des dernières décennies, avec de 17 à 24 tempêtes tropicales suffisamment importantes pour être baptisées d'un prénom, de 8 à 13 ouragans et de 4 à 7 ouragans majeurs. Dans son alerte d'août, la NOAA espérait que l'émergence d'une Niña Atlantique ait un effet d'atténuation sur la formation de ces tempêtes. Mais début septembre, elle devait confirmer une saison des tempêtes au-dessus de la normale. Dommage pour les États du golfe du Mexique et les départements français de Guadeloupe et de Martinique, qui pouvaient espérer une réduction du nombre des cyclones avec le refroidissement des eaux de surface.



Une baisse de température de 1 °C a été enregistrée à la surface de l'océan en juin-juillet 2024 par rapport à 1982-2023 dans la zone équatoriale de l'Atlantique Nord, malgré des alizés particulièrement faibles (flèches grises). Partout ailleurs, l'eau n'a jamais été aussi chaude.

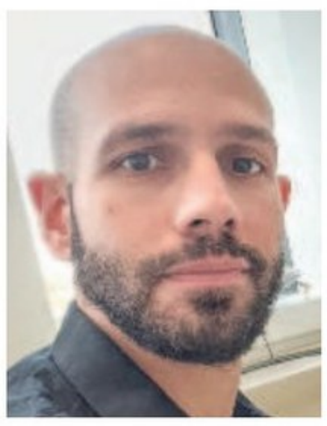
sciences du climat et de l'environnement (LSCE, CEA/CNRS). *Par ailleurs, le réchauffement des eaux tropicales peut favoriser la création d'ouragans affectant l'arc caribéen et les États-Unis.* »

Les Niño et Niña Atlantique n'ont pas la notoriété, ni l'importance, de leurs homologues du Pacifique. « *Le bassin est plus petit, si bien que l'influence est plus faible* », expose Davide Faranda. Si les Niños du Pacifique affectent l'ensemble de la planète, ceux de l'Atlantique n'auraient ainsi qu'un effet régional. Reste que l'annonce d'un refroidissement de l'Atlantique a provoqué un tsunami de réactions sur les réseaux sociaux et de mails auprès des services de la NOAA. De nombreuses personnes — dont beaucoup de climatosceptiques — se sont étonnées d'un résultat contradictoire avec les annonces faites par l'organisme américain sur la température moyenne croissante des eaux de surface de l'océan. Début septembre, elle était de 21 °C, soit 1 °C de plus qu'en 1985. L'annonce d'un refroidissement a donc perturbé le public et provoqué un afflux d'interprétations hâtives des résultats, ce qui a contraint la NOAA à se fendre d'un rectificatif fin août.

L'agence précise ainsi d'emblée que le refroidissement ne concerne qu'une zone bien précise de l'Atlantique équatorial. Partout ailleurs, les températures de surface du bassin de l'Atlantique Nord n'ont jamais été aussi hautes. « *Il faut en effet relativiser cet écart de température,* table Davide Faranda. *La température en surface étant très élevée, une baisse de 1 °C ne représente qu'un retour vers une situation plus normale.* » L'hypothèse d'une Niña en formation s'est par ailleurs affaiblie. L'anomalie de température s'est fortement résorbée dans la deuxième quinzaine d'août, si bien que l'avènement du phénomène n'a pas été confirmé.

Reste que les constats effectués cette année ne trouvent pas d'explication. On ignore pourquoi les eaux de la zone tropicale se sont tant refroidies subitement, alors que les alizés étaient faibles. Et les climatologues ne comprennent pas non plus pourquoi La Niña s'est estompée après avoir semblé très forte. « *Cela montre où nous devons porter nos efforts,* conclut Davide Faranda. *On commence à bien comprendre comment fonctionne la circulation atmosphérique, on mesure bien les caractéristiques physicochimiques des eaux de surface, mais on sait encore très peu de choses sur les mécanismes en jeu dans les profondeurs océaniques.* » ■

Loïc Chauveau


D. FARANDA

« La température en surface étant très élevée, une baisse de 1 °C ne représente qu'un retour vers une situation plus normale »

Davide Faranda, directeur de recherche au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE, CEA/CNRS)

GARO/PHANIE

Alerte aux plastiques dans nos aliments

L'eau que nous buvons et les aliments que nous ingérons sont pollués par des particules invisibles de plastique. Le constat est sans appel : l'ensemble de la chaîne alimentaire est touché. Les chercheurs ont pu mettre en évidence des effets toxiques et inflammatoires de ces particules sur les systèmes respiratoire, digestif, nerveux, cardio-vasculaire, immunitaire et même reproductif. Enquête.

Par Sylvie Boistard et Hervé Ratel

En moins d'un siècle d'existence, la matière plastique issue du pétrole a envahi la totalité de nos activités humaines en raison de son incroyable versatilité et de son faible coût. En 2019, nous en avions fabriqué plus de 8 milliards de tonnes depuis les années 1950 ! Mais cette médaille en plastique a son revers : la pollution. Chaque année, ce sont plusieurs millions de tonnes de déchets plastiques qui entrent dans l'environnement, affectant l'intégralité de la biosphère et tous les écosystèmes. Parce que le plastique se fragmente en minuscules particules, aucun d'entre eux n'est en effet épargné et toute la chaîne alimentaire est touchée sur l'intégralité de la planète, des terres les plus isolées aux fonds des océans en passant par les basses couches de l'atmosphère.

Une étude de janvier a révélé que les manchots des îles Galapagos présentaient un des taux de contamination les plus élevés parmi les animaux marins, suivis par les sardines, les harengs et le zooplancton. Et fin août, c'est dans les cerveaux humains qu'une étude américaine déclarait avoir détecté des microplastiques à une concentration très élevée, 20 fois supérieure à celles retrouvées dans le foie ou les reins. À quel point nos assiettes et nos verres sont-ils contaminés ? Et avec quels effets sur la santé ? *Sciences et Avenir* a mené l'enquête.

EAUX

L'effrayante contamination dans les bouteilles en plastique

Les travaux scientifiques sont sans appel : l'eau que nous buvons est polluée par des particules invisibles de plastique issues de l'activité humaine. Et leur présence est bien logiquement supérieure dans les eaux elles-mêmes embouteillées dans du plastique. En 2018, une étude américaine a évalué que sur 259 bouteilles de 11 marques différentes, 93 % étaient polluées avec des microplastiques. Des particules mais également des fibres allant de 6 à 100 micromètres. Selon cette analyse, un litre contient en moyenne 325 particules, des fragments provenant essentiellement de l'embouteillage. À titre de comparaison, une autre étude, allemande celle-ci, avait évalué cette même année le nombre de microplastiques dans les eaux souterraines et n'en avait décelé qu'une dizaine par mètre cube, soit 30 000 fois moins !

Un an plus tard, une méta-analyse réalisée par une équipe canadienne, compilant 26 études sur la question, révélait que ceux qui boivent de l'eau en bouteille ingèrent 20 fois plus de plastique que ceux qui s'abreuvent au robinet, soit près de 100 000 microparticules par an. Et encore, estiment les chercheurs, ces chiffres sont sous-évalués, étant donné les limitations liées à la méthodologie et aux données disponibles. Selon une étude de 2019 de l'université de Newcastle (Royaume-Uni), nous pourrions ingérer chaque semaine 5 grammes de plastique. Soit l'équivalent d'une carte de crédit… La situation est encore bien pire avec des bouteilles faites de plastique recyclé. « *J'ai eu l'occasion de visiter une usine de recyclage,* témoigne Stéphane Peyron, professeur à l'université de Montpellier. *La pollution plastique y est omniprésente. J'ai eu l'impression de respirer du plastique pour dix vies. D'un point de vue environnemental, recycler le plastique semble une solution vertueuse. Mais en réalité, d'un point de vue sanitaire, c'est une catastrophe : ces bouteilles recyclées et leurs contenus sont encore plus contaminés.* »

En France, pour le moment, ce genre de travaux n'a été réalisé par aucun organisme public. Seule une association, Agir pour l'environnement, s'est attelée à la tâche en 2019. Limitée, cette étude avait alors décelé des microplastiques dans 78 % des eaux testées. L'analyse avait été critiquée par un communiqué du Syndicat des eaux de source et des eaux minérales naturelles (Sesemn) pour sa

PRODUCTION

L'eau de source, loin d'être si pure

Si les microplastiques contaminent l'intégralité de la planète, ils sont loin d'être les seuls polluants. Pendant longtemps, les producteurs d'eau en bouteille ont justifié le prix exorbitant de leurs produits (100 fois celui de l'eau du robinet) par leur pureté et leur absence de contaminants, du fait que les eaux étaient puisées en profondeur dans les nappes souterraines. Mais le masque est tombé en début d'année à la suite d'une enquête conjointe du *Monde* et de Radio France. Le groupe Sources Alma (qui produit entre autres Cristaline, Saint-Yorre, Vichy Célestins) et le groupe Nestlé Waters (Vittel, Perrier, Contrex, Hépar) utilisent des systèmes de filtration et de purification (charbon actif, ultraviolet) qui leur sont interdits par la réglementation, leurs eaux étant censées être de source ou de « *pureté originelle* », selon la formule consacrée. Or, cela fait des années que ce n'est plus le cas et que les industriels ont tenté de dissimuler, par des traitements de désinfection et de dépollution non autorisés, le fait que leurs ressources aquifères étaient largement polluées. Comme le concluait une expertise révélée en avril et réalisée par le laboratoire d'hydrologie de Nancy pour le compte de l'Anses, les eaux de nombreux puits dans la région Grand Est (Hépar, Vittel, Contrex) et en Occitanie (Perrier) contiennent des traces de polluants chimiques, de pesticides ou de contamination bactérienne d'origine fécale. Pour les experts de l'Anses, ces résultats démontrent un « *niveau de confiance insuffisant* » quant à « *la qualité sanitaire des produits finis* ».

Une récente étude menée par une équipe de l'université Columbia (États-Unis) sur trois marques d'eaux en bouteille a détecté en moyenne 240 000 nanoparticules de plastique par litre d'eau en bouteille.

FRED MARVAUX/REA

faible amplitude, regrettant qu'elle n'ait pas été répliquée plusieurs fois et que seuls neuf produits aient été évalués. À cette occasion, le Sesemn déclarait que *« les eaux embouteillées sont pures et naturelles, et ne subissent aucun traitement chimique, préservées de toute pollution humaine.* » Une assertion démentie cinq ans plus tard *(lire l'encadré ci-contre)*.

Il n'empêche, pour lacunaire qu'elle soit, l'enquête d'Agir pour l'environnement avait notamment trouvé que la plus polluée des bouteilles était la Vittel Kids destinée aux enfants, essentiellement par des particules de polypropylène provenant du bouchon. Et l'association d'enfoncer le clou avec une étude parue en août sur les bouteilles de Coca-cola et de Schweppes. Elle relève que le nombre de microplastiques augmente nettement avec le nombre d'ouvertures de ces bouteilles, allant jusqu'à 60 particules par litre après 20 ouvertures. Ce qui n'étonne pas Stéphane Peyron : *« L'une des étapes les plus incriminantes se situe à ce niveau. En bouchant, débouchant une bouteille d'eau ou de soda, on génère d'autant plus de microplastiques.* »

Pour la recherche, l'un des principaux écueils vient du fait que l'on piste un polluant à l'aide d'outils constitués de ce même polluant. En clair, comment étudier la contamination par les microplastiques quand on utilise un matériel à base de plastique ? *« Ainsi, l'essentiel de notre activité ces dernières années a consisté à revoir nos habitudes de travail et tous nos processus analytiques,* explique Guillaume Duflos, de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). *Ce fut vraiment un très gros chantier. Désormais, on travaille dans des conditions où on limite la contamination par les plastiques dans notre environnement.* » La première norme de dosage des microplastiques est sortie en décembre 2023. *« À partir de là, on va pouvoir caractériser finement les niveaux de contamination et, par la suite, évaluer les limites toxicologiques,* ajoute-t-il. *Pour l'instant, les études sont en cours. En sachant qu'il n'y a pas de réglementation sur les microplastiques dans les eaux en bouteille. On est vraiment au tout début de cette problématique.* »

L'autre gros problème concerne l'identification des additifs des plastiques. Dans les bouteilles, ils permettent de moduler leurs couleur, brillance, souplesse ou rigidité. *« Or, ce sont eux qui seraient potentiellement les plus dangereux, d'autant plus qu'ils sont ajoutés en*

ANSES

« Il n'y a pas de réglementation sur les microplastiques dans les eaux en bouteille. On est vraiment au tout début de cette problématique »

Guillaume Duflos, directeur de recherche à l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses)

mélange, poursuit Guillaume Duflos. *On peut donc avoir des effets cocktails de ces additifs qui peuvent représenter plus de la moitié de la masse du plastique. Ces additifs ne sont pas directement fixés aux polymères et peuvent être relargués dans l'organisme. Et quand on sait qu'il existe plusieurs dizaines de milliers d'additifs potentiellement utilisables, les combinaisons sont infinies.* »

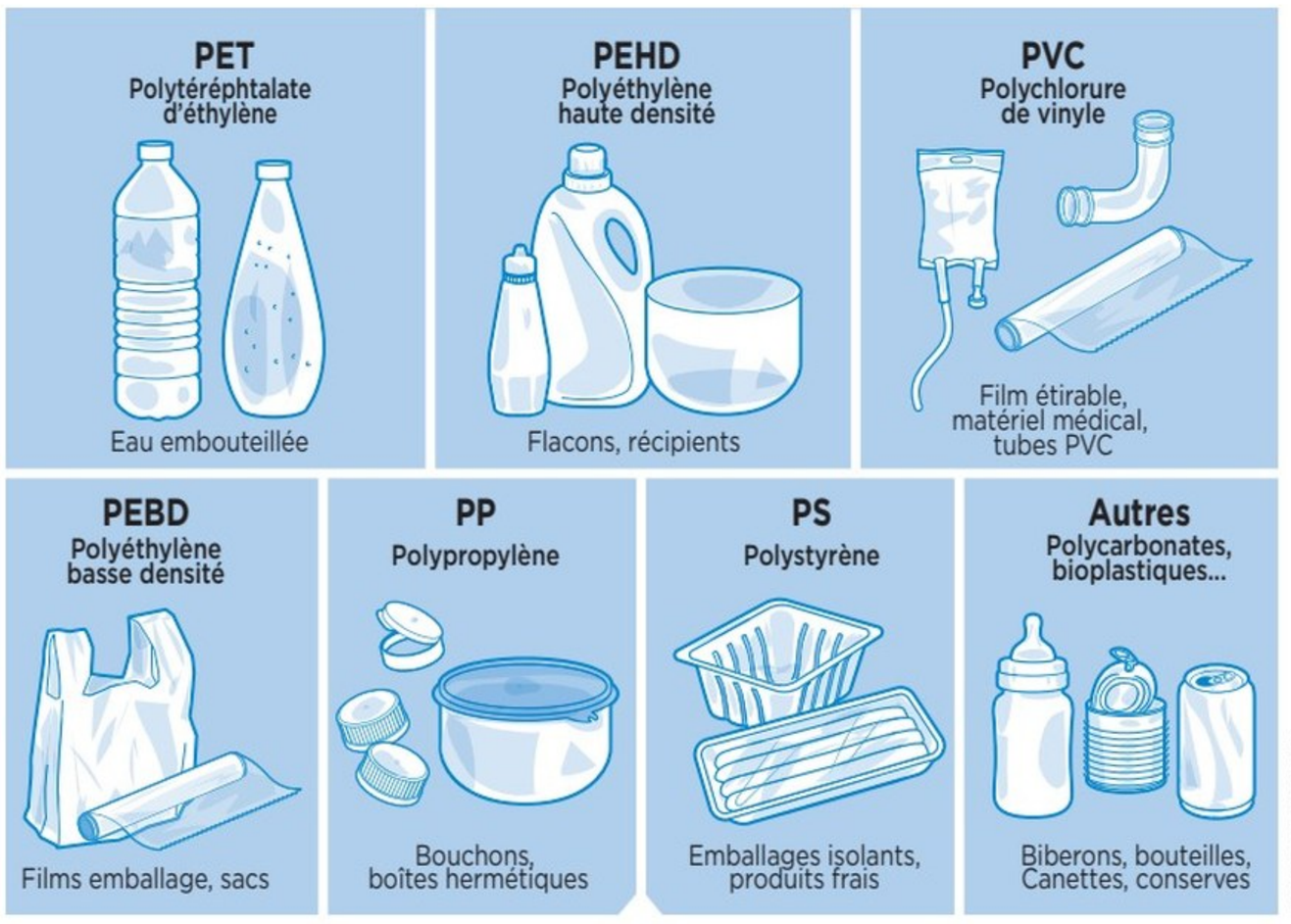
Une concentration plus importante chez les enfants

Mais, beaucoup de questions restent en suspens et le comportement de ces particules dans notre organisme n'en finit pas de questionner. Ainsi, de manière surprenante, souligne une étude chinoise de 2023, bien que les adultes boivent plus que les enfants et donc ingèrent plus de microplastiques, la concentration de particules s'avérerait plus importante dans l'organisme de ces derniers.

Et *quid* des particules encore plus petites ? Une étude de l'université Columbia (États-Unis) a fait grand bruit en début d'année en mettant en évidence, à l'aide d'une nouvelle technique de détection, que les eaux en bouteille contenaient des fragments encore plus petits, des nanoplastiques. Et pas qu'un peu. En moyenne, un litre en comporte jusqu'à 240 000 fragments ! Avec quels effets sur la santé ? La science n'en sait pour l'instant strictement rien. Et le gouffre des incertitudes est encore plus profond que celui concernant les microplastiques. Hélàs, en ce domaine, ce n'est pas parce que ces particules de plastique sont plus petites que leurs dommages seraient moins importants. L'exemple de l'empoisonnement à l'amiante pourrait même nous inciter à penser le contraire : c'est justement parce que les fibres d'amiante sont plus réduites que leurs propriétés invasives et les dommages cellulaires qu'elles occasionnent sont graves. Est-ce aussi le cas pour les nanoplastiques ? Les recherches à venir tenteront de répondre à cette question. ■ **H. R.**

ALIMENTS

Des produits pollués et victimes de l'emballage



37,5 millions de tonnes d'emballages alimentaires entièrement fabriqués en plastique ou en contenant sont utilisées chaque année dans le monde.

Salade, sel, moules, riz, filet de poulet, thé… Hélas, ce qui ne devrait être qu'une liste de courses bien ordinaire n'est autre qu'un panel non exhaustif d'aliments recensés comme contenant des microplastiques. Car aujourd'hui, force est de constater que l'ensemble de la chaîne alimentaire est touché. Un processus qui a mis des dizaines d'années à se développer et qui, en raison de ses différentes formes de contamination, commence à révéler ses effets délétères sur la santé. *« Sous l'effet des rayonnements ultraviolets, les plastiques sont dégradés en fragments de plus en plus petits — 1 micromètre (µm) à 5 millimètres pour les microplastiques et de 1 à 1000 nanomètres (nm) pour les nanoplastiques,* explique Xavier Coumoul, professeur de toxicologie (université Paris Cité) et directeur de l'équipe Metatox (Inserm/université Paris Cité). *Ils polluent les océans, les cours d'eau et les lacs et sont ingérés par les animaux marins et les poissons d'eau douce* ». Une partie des terres agricoles est, elle, polluée par les particules de plastique présentes dans l'air ambiant qui se déposent sur les sols, et par les boues des stations d'épuration utilisées comme fertilisants.

Et c'est sans compter les plastiques agricoles : d'après un rapport de l'Organisation des Nations

LES ALIMENTS CONTAMINÉS

Des microplastiques ont été décelés dans une multitude d'aliments :
Poissons, crustacés (crabes, crevettes)
Fruits de mer (huîtres, palourdes, moules)
Viande (bœuf, porc, poulet, etc.)
Boissons (thé, bière, vin blanc, lait, sodas, boissons énergisantes)
Fruits (pommes, poires)
Légumes (salade, brocoli, carottes)
Céréales (riz, blé)

unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) de 2021, l'agriculture consommerait à l'échelle de la planète 12,5 millions de tonnes de plastique par an, majoritairement pour le maraîchage et l'élevage (80 %). Dans le premier cas, il s'agit de films, bâches et gaines en plastique utilisés pour les tunnels et les serres, le paillage des sols ; dans le second, il s'agit des bâches d'ensilage pour conserver les fourrages. Or, les plantes cultivées absorbent par leurs racines les plus microscopiques fragments de plastique dégradé qu'elles transfèrent jusque vers leurs parties aériennes.

Des traces de microplastiques retrouvées dans les selles

Nos aliments sont ensuite recontaminés par les emballages (37,3 millions de tonnes utilisées par an). En raison de ses propriétés hydrophobes, le plastique a la capacité de migrer vers les aliments, notamment les plus gras ou les plus chauds. Exemple : les contenants en papier à usage unique, couramment utilisés pour le café et le thé, qui sont imperméabilisés avec une fine couche de film plastique, susceptibles de se détériorer au contact d'un liquide chaud et de reléguer des microplastiques dans la boisson. Dès lors, pas très étonnant que nous en ingérions à notre insu. En 2019, Philipp Schwabl et ses collègues de l'université de médecine de Vienne (Autriche) ont ainsi décelé la présence de divers types de microplastiques (principalement le polyéthylène téréphtalate et le polypropylène) dans les selles de huit volontaires sains de différents pays (Japon, Russie, Pays-Bas, Royaume-Uni, Italie, Pologne, Finlande et Autriche), avec en moyenne 20 particules de taille variable (entre 50 et 500 micromètres) pour 10 g de selle. Une découverte qui n'épargne pas les plus jeunes, des microplastiques ayant également été retrouvés dans les selles de nourrissons, selon des travaux parus en 2021. ■ **S. B.**

SEBASTIAN KAULITZKI/SPL/SUCRÉ SALÉ

Les microparticules plastiques ingérées perturbent le microbiote intestinal, en favorisant le développement de certaines bactéries potentiellement néfastes (illustration).

TOXICITÉ

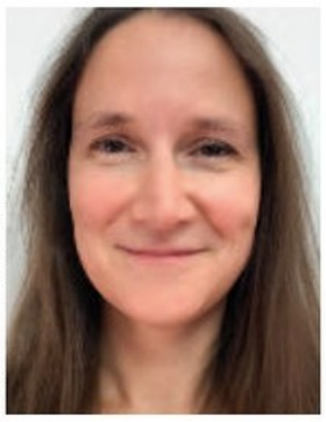
Quel impact sur la santé ?

En début d'année, une équipe de l'université de Pékin (Chine) a tenté avec une méta-étude de faire le point sur l'ensemble des connaissances relatives à la toxicité des plastiques que nous ingérons. Les conclusions préliminaires ne sont pas rassurantes. En résumé, tout en soulignant le cruel manque de données concernant l'impact exact des microplastiques sur la santé humaine, leurs interactions avec des bactéries pathogènes et des agents chimiques, l'effet de leurs propriétés physicochimiques et de leurs migrations dans l'organisme au fil du temps, les chercheurs ont pu mettre en évidence des effets toxiques et inflammatoires de ces particules sur les systèmes respiratoire, digestif, nerveux, cardio-vasculaire, immunitaire et reproductif. Et de rappeler que des microplastiques ont été retrouvés dans les placentas humains, dans le sang, bref, un peu partout dans l'organisme, ce qui implique que ces particules migrent facilement de l'estomac au système circulatoire.

Du reste, les microplastiques peuvent convoyer d'autres composés dangereux. En effet, *« les surfaces plastiques sont d'excellents vecteurs pour transporter des contaminants chimiques, des bactéries,* avertit Guillaume Duflos de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses). *Un peu l'effet "cheval de Troie". Nous en sommes au tout début de l'évaluation de leur potentialité toxique.* » Bien qu'il n'existe encore aucun véritable lien de cause à effet, ni de risque sanitaire clairement établi, les plus récents travaux laissent penser que ces particules plastiques pourraient perturber le fonctionnement de l'organisme et influencer le risque de développer certaines pathologies.

En mars, une étude italienne menée auprès de près de 300 individus et parue dans le *New England Journal of Medicine* a ainsi montré pour la première fois un risque multiplié par quatre d'accident vasculaire cérébral (AVC), d'infarctus du myocarde ou de décès toutes causes confondues chez des patients présentant des plaques d'athérome (dépôts de lipides au niveau des artères) contenant des microplastiques (principalement du polyéthylène ou du polychlorure de vinyle). D'autres études s'interrogent aussi sur le rôle des micro- ▶

plastiques dans le déclin de la fertilité, des chercheurs de l'université du Nouveau-Mexique, aux États-Unis, ayant très récemment trouvé une corrélation entre de forts taux de polychlorure de vinyle (PVC) présents dans les testicules de chiens et la diminution de la quantité de spermatozoïdes viables.


MATHILDE BODY-MALAPEL

« Les microparticules pourraient influencer le risque de certaines maladies cancéreuses, inflammatoires ou immunitaires »

Mathilde Body-Malapel, ingénieure de recherche à l'Institut de recherche translationnelle sur l'inflammation (Infinite) à Lille

Un effet pro-inflammatoire et pro-oxydant

Les microplastiques porteraient également atteinte au microbiote intestinal, comme l'a constaté, chez la souris, l'équipe de Mathilde Body-Malapel de l'Institut de recherche translationnelle sur l'inflammation (Infinite) à Lille. « *Outre un effet pro-inflammatoire et pro-oxydant, les microplastiques augmentent la perméabilité de la barrière intestinale, qui normalement empêche les agents pathogènes (bactéries, virus, etc.) de passer dans la circulation sanguine. Ces différentes observations sont autant d'éléments qui laissent à penser que ces microparticules pourraient influencer le risque de certaines maladies cancéreuses, inflammatoires ou immunitaires* », note l'ingénieure de recherche, qui travaille sur le rôle des microplastiques dans l'apparition de maladies inflammatoires de l'intestin (Mici).

Mais ce n'est pas tout. Stéphanie Blanquet-Diot, professeure de microbiologie et biotechnologie et directrice adjointe de l'unité Medis à l'université Clermont-Auvergne, et des chercheurs du laboratoire de toxicologie alimentaire Toxalim à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) de Toulouse ont également observé une perturbation (ou dysbiose) de la population bactérienne intestinale, grâce à leur modèle *in vitro* pour le moins original recréant l'environnement d'un véritable côlon humain. « *Ce côlon artificiel simule les conditions d'acidité, le temps de transit, les nutriments et l'absence d'oxygène spécifiques de cet environnement. Il est également ensemencé avec des selles humaines pour reproduire la flore bactérienne* », note Stéphanie Blanquet-Diot. En injectant dans ce côlon « artificiel » des microbilles de polyéthylène (PE) (21 mg/jour) durant deux semaines de manière quotidienne, l'équipe a constaté une augmentation de certaines populations bactériennes potentiellement néfastes (*Enterobacteriaceae*, *Desulfovibrionaceae*, etc.).

Des résultats similaires ont été constatés en renouvelant l'expérience avec les selles d'enfants. « *Nous avons aussi remarqué par microscopie électronique une adhésion des micro-organismes à la surface des microparticules de polyéthylène, ce qui pourrait leur servir de surface d'ancrage pour se développer plus facilement* », explique Elora Fournier, coauteure de ces études. Réciproquement, « *l'écosystème digestif (pH, enzymes, bactéries) pourrait être propice à la biodégradation de certains types de microplastiques et à la libération de substances chimiques intrinsèquement toxiques* », ajoute Muriel Mercier-Bonin, directrice de recherche Inrae à Toxalim. Prochains enjeux: établir l'impact sanitaire de diverses formes de particules (fragments, fibres) plus ou moins vieillies pour se rapprocher au mieux des conditions réelles d'exposition. « *Selon la forme et la taille de ces particules de plastique, l'impact sur l'organisme pourrait être très différent* », note Mathilde Body-Malapel.

Consciente du problème, l'Anses mène de son côté divers projets de recherche (Nanoplastics, Fishh, CPER Marco) afin d'évaluer la quantité et la nature des particules plastiques présentes dans les aliments, ainsi que le niveau d'exposition et le risque pour la santé humaine. Par ailleurs, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) et les ministères de l'Agriculture et de la Transition écologique ont demandé à l'Inrae et au CNRS de réaliser une expertise dont l'objectif est d'établir un état des lieux des connaissances scientifiques sur les usages et les impacts environnementaux et sanitaires des plastiques en agriculture et pour l'alimentation. Les conclusions sont attendues à la fin de l'année. ■

S. B. et H. R.

CONSEILS

Comment se protéger

- Limiter la consommation de plats préparés emballés ou réchauffer leur contenu dans une assiette au micro-ondes plutôt que dans leur barquette d'origine.
- Préférer l'eau du robinet, moins contaminée que l'eau en bouteille.
- Limiter l'achat de fruits, légumes et viandes emballés.
- Préférer des contenants en verre plutôt que des sacs à congélation.
- Déverser café, céréales dans des récipients en verre afin qu'ils restent le moins longtemps possible en contact avec des emballages plastifiés.
- Ne pas laisser de nourriture chaude dans un contenant en plastique.
- S'équiper d'une gourde réutilisable en inox ou en verre.
- Apporter ses propres sacs en tissu et contenants en verre chez les commerçants.

PUBLICITÉ

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

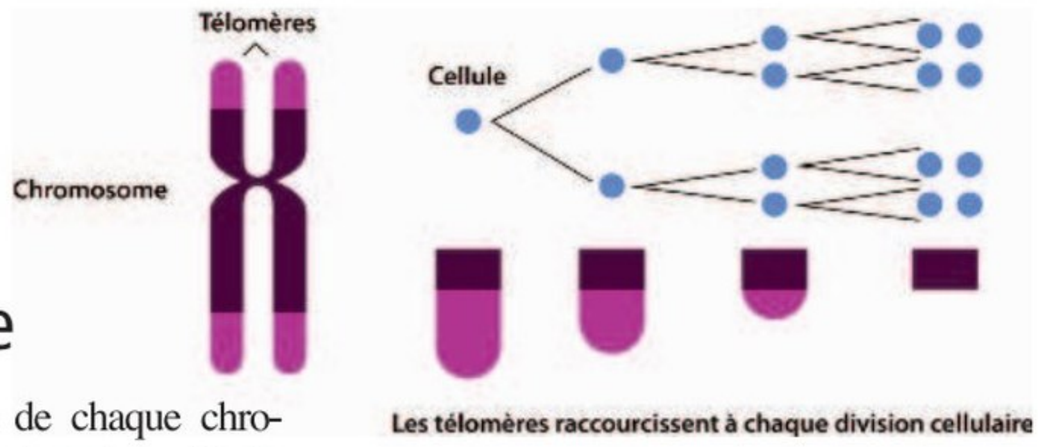
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase



Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

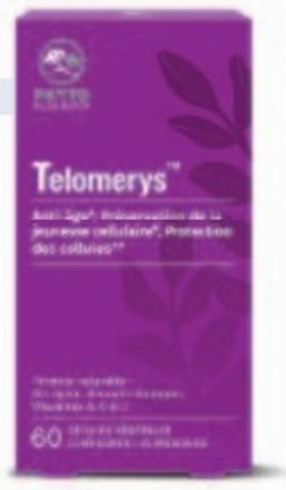
Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par déclencher la fin du cycle de reproduction de la cellule, appelé sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifi ques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffi sent pour constater une diminution signifi cative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Des conseils ?

Les experts du laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 85 42 32 59** et sur www.telomerys.com



Telomerys™ :
Préservation de la jeunesse cellulaire

Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56

Variole du singe : la crainte d'une nouvelle pandémie

Une récente flambée de mpox a incité l'OMS à lancer un vaste plan de vaccination des populations à risque en Afrique centrale. Car la nouvelle souche identifiée pourrait témoigner d'une plus grande contagiosité du virus. Décryptage.

Nouvelle pandémie en vue ? En République démocratique du Congo (RDC), une hausse des cas de mpox, nom de code officiel de la variole du singe (*monkeypox* en anglais), a allumé les alarmes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Au point de déclarer la maladie, dès le 14 août, urgence de santé publique de portée internationale, et de lancer ainsi un plan stratégique visant à enrayer une fois pour toutes les flambées de transmission interhumaine de mpox. Cette infection virale endémique en Afrique avait déjà inquiété le monde entier en 2022, lorsqu'une flambée épidémique avait touché plus de 100 000 personnes dans une centaine des pays, dont près de 3000 en France.

Depuis, ce virus — cousin de la variole humaine éradiquée en 1980 — a continué de circuler à bas bruit sur le continent africain, mais sans inquiéter outre mesure les agences sanitaires. Alors, pourquoi déclencher l'alarme cette fois ? La première source d'inquiétude est l'ampleur de cette nouvelle flambée épidémique. Selon le Centre africain de contrôle et de prévention des maladies, il y a eu environ 37 000 cas de mpox dans le continent entre janvier 2022 et août 2024, repartis dans 15 pays africains. Plus d'un tiers (près de 14 000) sont survenus en RDC rien qu'en 2024. Cette accélération soudaine des contaminations pourrait témoigner d'une plus grande contagiosité du virus. D'autant qu'il a atteint le Burundi, le Kenya, le Rwanda et l'Ouganda, des pays voisins qui n'avaient jamais rapporté de cas de mpox auparavant. « *Je ne pense pas que le virus soit devenu plus contagieux, cette propagation rapide de cas s'explique plutôt par la population touchée* », nuance toutefois Olivier Schwartz, responsable de l'unité virus et immunité à l'Institut Pasteur. De fait, environ un tiers des personnes infectées lors de cette flambée sont des travailleuses du sexe, avec une moyenne d'âge de 22 ans. Cette haute transmissibilité serait donc due majoritairement à des infections lors de rapports sexuels avec leurs clients.

Une population hétérosexuelle à haut risque de transmission

C'est d'ailleurs la première fois que la transmission sexuelle entre adultes est le moteur principal d'une épidémie de mpox. Jusqu'ici, ce virus touchait principalement les enfants (moins de 15 ans). « *Le mode de transmission classique affecte plutôt des enfants à partir d'un animal réservoir infecté ; c'est une transmission zoonotique et cela reste confiné à quelques cas intrafamiliaux,* rappelle Antoine Gessain, spécialiste du mpox à l'Institut Pasteur. *Alors que, dans cette région minière adossée aux pays d'Afrique de l'Est, il s'agit d'une transmission hétérosexuelle liée aux mineurs*

GLODY MURHABAZI / AFP

L'un des symptômes principaux de l'infection au virus mpox, outre la fièvre et les douleurs musculaires, est une éruption cutanée. Ici à Kavumu, dans l'est de la République démocratique du Congo, épicentre de la maladie, le 24 août.

et aux femmes travailleuses du sexe. Le virus se répand plus parce qu'il est entré dans une population présentant un haut risque de maladies sexuellement transmissibles. » Or ce virus se transmet principalement par contact direct entre peau ou muqueuse infectée et peau saine.

L'autre motif d'inquiétude, justifiant l'attention particulière de l'OMS, est que ces nouvelles infections ne seraient pas dues à la même souche ayant parcouru le globe en 2022, mais à une nouvelle, potentiellement plus dangereuse. Dans un article publié par *Nature Medicine* le 13 juin, des chercheurs de l'Institut national de recherche biomédicale à Kinshasa, en RDC, ont séquencé le génome de virus collectés chez 22 patients. Ils ont ainsi mis en évidence qu'il s'agit d'une souche distincte de celles connues auparavant, et qu'elle appartient au clade 1, qui a une létalité plus élevée que le clade 2, responsable de l'épidémie de 2022. Cette nouvelle souche baptisée « mpox 1b » s'ajoute ainsi au mpox 1a et au mpox 2. *« Dans cette épidémie, le virus a muté dans le cadre de la transmission interhumaine quasi exclusive. Mais le virus ne se transmet pas plus rapidement à cause de cette adaptation, c'est le mode de transmission (sexuelle) qui facilite sa diffusion,* précise Antoine Gessain. *Comme lors de la pandémie de 2022, qui affectait principalement les hommes ayant des relations homosexuelles. La population était à très fort risque de transmission, le virus n'était pas vraiment plus contagieux, mais ce mode de transmission et cette population à risque ont facilité sa propagation.* »

Si mpox 1b n'est pas forcément plus contagieux, pourrait-il en revanche être plus dangereux ? Sur les presque 14 000 cas en RDC, 450 sont décédés à cause du virus. Soit un taux de létalité d'environ 3 %, bien supérieur à celui de l'épidémie de 2022, au cours de laquelle 208 personnes avaient trouvé la mort sur près de 100 000 infections confirmées ; soit un taux de létalité de 0,2 %. ▶

ANTOINE GESSAIN

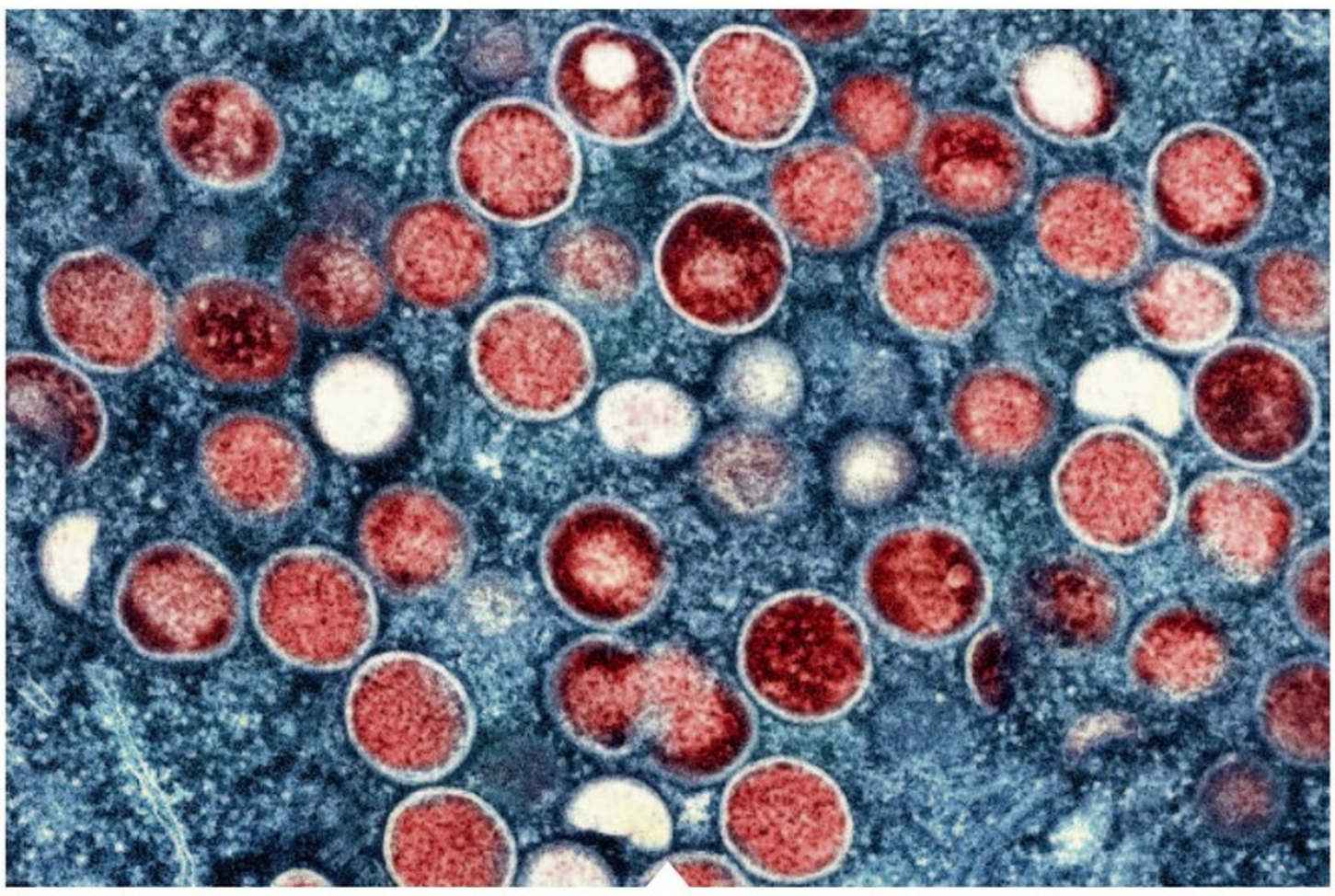
« Dans cette épidémie, le virus a muté dans le cadre de la transmission interhumaine quasi exclusive »

Antoine Gessain, virologue spécialiste du mpox à l'Institut Pasteur

Mais le pire n'est jamais certain : *« À ce jour, il n'y a aucune preuve que ce virus soit plus grave ou dangereux qu'avant,* rassure Antoine Gessain. *Cela dit, il est très difficile de comparer la létalité, car elle dépend avant tout du contexte dans lequel se trouvent les malades.* » En effet, si la létalité du mpox 1 apparaît comme plus élevée, c'est peut-être parce qu'il affecte principalement des enfants souvent dénutris et déshydratés, sujets aux surinfections bactériennes, des lésions cutanées caractéristiques du mpox ; ainsi que les adultes de leur entourage, qui ont souvent des comorbidités telles que le VIH. *« Je ne crois pas qu'il y ait d'inquiétude supplémentaire particulière à avoir,* confirme Olivier Schwartz. *En revanche, il faut être prudent et vigilant pour éviter la propagation.* »

L'urgence est de juguler l'épidémie en Afrique centrale

Alors, si ce nouveau mpox 1b n'est pas nécessairement plus contagieux ni plus dangereux, pourquoi l'OMS a-t-elle déclaré l'urgence aussi rapidement ? *« Ce qui a provoqué cette réaction n'est pas un risque virologique différent des variants précédents, mais le besoin de mettre en branle des éléments de réponse, de diagnostic et de vaccination* », éclaire Olivier Schwartz. *« Cette déclaration de l'OMS a servi à favoriser la mise en place de moyens humains, financiers et logistiques, associés à un travail important et crucial de sensibilisation des populations à risque localement et de prise en charge efficace,* renchérit Antoine Gessain. *Un élément important pour faire baisser ce type d'épidémie est la vaccination ciblée dans les populations à risque. Or, le vaccin n'était pas disponible en Afrique centrale. Cette urgence permettra de résoudre ce problème pour essayer d'arrêter l'épidémie localement, mais aussi la diffusion du virus au niveau loco-régional.* »



NIAID / AP / SIPA

Particules du virus (en rouge) dans une cellule infectée (en bleu), vues au microscope.

RECOMMANDATIONS

La France sous surveillance

Depuis le début de l'année 2024, 126 cas de mpox ont été enregistrés dans l'Hexagone. Une circulation relativement faible du virus qui constitue surtout la traîne de l'épidémie importante de 2022. Les infections sont en effet dues à la souche qui sévissait alors, et non au mpox 1b qui a déclenché l'alerte de l'Organisation mondiale de la santé cet été. Pour prévenir l'émergence de cette nouvelle souche, la Haute Autorité de santé a toutefois actualisé ses recommandations vaccinales début septembre. Outre les travailleurs du sexe et les hommes ayant des relations homosexuelles à risque, les personnes immunodéprimées comme celles ayant été en contact avec un malade sont appelées à se faire vacciner. Et ce jusqu'à 14 jours après le contact, le vaccin ayant aussi démontré une efficacité post-exposition au virus.

Ce vaccin, produit par Bavarian Nordic sous le nom de Imvanex en Europe, contient le virus vivant modifié atténué de la vaccine Ankara, membre de la famille des poxviridés, tout comme le mpox et la variole, qui sont aussi ciblés par le vaccin. Il a déjà montré son efficacité contre le mpox 1a, et il est donc très probable qu'il le sera aussi contre le mpox 1b. L'arrivée de ce vaccin dans les régions touchées pourrait donc ralentir l'épidémie rapidement, car seulement une partie de la population a besoin de cette protection. *« Vu le mode de transmission et le fait que ce virus ne se transmet pas aussi efficacement que la variole, d'un point de vue virologique il ne semble pas nécessaire de vacciner toute la population, seulement celles à risque, sachant que pour l'instant le virus semble se propager chez les travailleurs du sexe et chez les gens qui les fréquentent,* souligne Olivier Schwartz. *Si on applique les mesures déjà mises en place en 2022, on devrait pouvoir diagnostiquer les cas rapidement et puis faire ce qu'il faut pour empêcher la propagation.* »

« Il est vraiment très peu probable que nous ayons une pandémie de la même ampleur que celle de 2022 », conclut Antoine Gessain. Tout dépend désormais de la vitesse de la réponse, notamment de l'envoi rapide de suffisamment de doses du vaccin pour stopper la propagation, tant qu'elle reste gérable. ■

Nicolas Gutierrez C.

PUBLICITÉ

Fonctionnement du cerveau

Mémoriser, raisonner, anticiper, planifier, comprendre… les capacités du cerveau sont illimitées.

Au rythme du cerveau

Le cerveau émet en permanence des ondes dont la fréquence dépend de son activité. Eveil, sommeil, phase intense de réflexion : pour chaque état cérébral, l'activité neuronale est caractérisée par un type d'onde.

Ondes alpha, bêta, gamma : leur rôle est complexe et leur émission par le cerveau dépend de nombreux facteurs, comme l'état psychologique ou encore l'alimentation.

Des études récentes ont par exemple montré le lien étonnant entre Thé vert et ondes alpha. Les feuilles de Thé vert contiennent naturellement une substance appelée L-théanine. Malgré son nom, elle n'a aucun lien avec la théine et ne provoque aucune excitation, bien au contraire. La L-théanine régule la production d'ondes alpha : en situation d'effort intellectuel prolongé, elle est capable de diminuer leur production par le cerveau, ce qui favorise la mémorisation et la concentration. À l'inverse, si le cerveau se trouve en phase d'endormissement, elle stimule leur émission, d'où un effet relaxant propice au sommeil.

Théorie des signatures

La Théorie des Signatures était une méthode d'observation dans l'Antiquité, selon laquelle l'aspect des plantes était une indication de leurs bienfaits pour le corps. La science moderne a depuis confirmé l'efficacité de certaines plantes sur la partie du corps à laquelle elles ressemblent. Ainsi débarrassée de sa coque, la Noix ressemble fortement à un cerveau. Elle est riche en Omegas et en antioxydants, et plusieurs études ont montré ses bienfaits sur la mémoire.

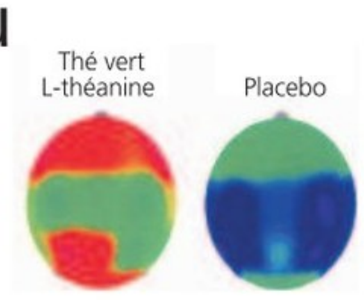
Indispensable irrigation

Le cerveau est incapable de constituer des réserves, et doit donc être alimenté en permanence en glucose. Celui-ci est apporté grâce à un vaste réseau de capillaires, de petits vaisseaux sanguins qui permettent d'irriguer efficacement l'ensemble du cerveau. Leurs fines parois laissent passer le glucose mais aussi l'oxygène indispensable au bon fonctionnement du cerveau. En effet, quelques minutes seulement sans oxygène y entraîne des lésions irréversibles. Là encore, l'alimentation et le mode de vie en général jouent un rôle primordial. La consommation d'aliments riches en antioxydants qui protègent les capillaires, et plus spécifiquement en polyphénols, influence directement le fonctionnement cérébral. Les recherches convergent notamment sur le Pin maritime, dont l'écorce renferme de grandes quantités de proanthocyanidines ou OPC, des polyphénols capables de stimuler la microcirculation sanguine dans les capillaires.

B comme bénéfiques

Le cerveau utilise aussi une multitude de vitamines et minéraux pour fonctionner. Un apport suffisant en vitamines B est particulièrement bénéfique pour maintenir des fonctions cognitives normales (mémoire, concentration, attention). La vitamine B5 par exemple est essentielle à la production de neurotransmetteurs, des substances chimiques qui permettent aux signaux électriques de passer d'un neurone à l'autre pour faire circuler l'information.

Le cerveau passé au scanner



L'activité cérébrale peut être observée grâce au scanner qui met en évidence les zones activées en fonction de l'état dans lequel se trouve le cerveau. La consommation de L-théanine (en rouge) active les zones de la mémoire et de la concentration. Sans L-théanine, ces zones restent inactives (en bleu). Les nombreux travaux de recherche effectués sur le fonctionnement du cerveau ont permis de mettre au point des solutions pour améliorer les fonctions cognitives et les performances intellectuelles. Le laboratoire de recherche végétale New Nordic a mis au point une formule complètement naturelle à base de plantes et vitamines. Baptisée **Cerveau Clair**, elle contient des extraits concentrés de Thé vert, de Noix, de Pin maritime et de Grenade, associés à des vitamines et de l'Iode pour optimiser les performances cérébrales. Ces actifs sont capables d'atteindre le cerveau en quelques heures et sont efficaces sur le long terme. Ils sont donc indiqués pour stimuler les capacités intellectuelles, la concentration et la mémoire, notamment en période de révisions ou d'examens, mais aussi pendant des programmes de plusieurs mois. Les actifs de **Cerveau Clair** atteignent rapidement le cerveau, pour une efficacité en moins d'une heure. Réservé aux adultes de plus de 15 ans.

Des conseils ?

Les experts New Nordic vous répondent au **01 85 42 31 59** ou sur **www.vitalco.com**

Disponible en pharmacie

Cerveau Clair 60 et 120 cp sont disponibles grâce aux codes **ACL 295 18 63** et **636 08 99**

Comment réduire sa consommation de sel

Diminuer sa prise alimentaire quotidienne de sodium aura un impact positif sur la santé. Des alternatives existent.

Gros, gris, aromatisé… Ces petits grains ont longtemps été l'un des seuls moyens de conserver les aliments avant que l'industrie agroalimentaire ne les incorpore dans divers produits comme exhausteur de goût. Si la quantité de sel tend à baisser dans les pains de boulangerie (1,4 g/100 g pour les baguettes depuis octobre 2023, au lieu de 1,5 g/100 g avant) (1), les plats préparés et aliments transformés (charcuterie, sauces, chips, etc.) en fournissent encore en de trop grandes quantités. En France, les adultes consomment ainsi des teneurs de sel bien supérieures aux 5 g (une cuillerée à café) par jour recommandés par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), et les enfants, davantage que les 2 g/jour conseillés. Pourtant, les avantages pour la santé d'une réduction de sa consommation sont nombreux. Explications.

Des traitements différents

Le sel de table ou chlorure de sodium (NaCl) provient en France de l'évaporation de l'eau de mer des marais (Guérande, Salin-de-Giraud) ou de l'extraction de gisements souterrains (Varangéville). Le gros sel et le sel fin raffiné, marin ou **gemme**, ont été nettoyés par un procédé chimique de toutes leurs impuretés, mais également de tous leurs minéraux. Des anti-agglomérants et composés fluorés ou iodés sont habituellement rajoutés. Le sel marin gris et la **fleur de sel** n'ont, eux, subi aucun traitement et renferment naturellement des minéraux et oligo-éléments (magnésium, potassium, calcium, iode, etc.). On trouve aussi divers sels à travers le monde (rose de l'Himalaya, noir d'Hawaii, Halen Môn du Pays de Galles, etc.).

9 et 7 grammes

de sel sont consommés chaque jour respectivement par les hommes et les femmes en France. Jusqu'à 10 ans, les enfants en ingèrent 4,4 g, puis 6,5 g entre 11 et 17 ans.

(SOURCE: INCA 3, 2017.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

SEL GEMME Sel de roche ou halite dont la formation remonte à des millions d'années, lorsque d'anciens océans se sont évaporés, laissant derrière eux des dépôts de sel. C'est le cas du sel rose de l'Himalaya.

FLEUR DE SEL Mince couche de cristaux blancs qui se forment et se récoltent en surface des marais salants.

SODIUM Minéral présent dans les fruits et légumes et dans le sel de table. 1 g de sel renferme 400 mg de sodium et 600 mg de chlorure.

L'excès de sel cause diverses pathologies...

Consommer trop de sel favorise l'ostéoporose et augmenterait de 40 % le risque de cancer de l'estomac. Parmi les hypothèses avancées, l'excès de sel perturberait la muqueuse gastrique qui deviendrait plus sensible à certaines bactéries pathogènes (2). Chez la souris et l'humain, le sel modifierait l'équilibre énergétique des cellules du système immunitaire, les amenant à produire moins d'adénosine triphosphate (ATP). Les phagocytes, chargés d'identifier et d'éliminer les agents pathogènes de l'organisme, sembleraient toujours lutter contre les infections, mais avec un effet amoindri (3).

... et diminue l'espérance de vie

Comparé aux individus qui ne resalent jamais leurs plats, ajouter systématiquement du sel expose à un risque accru de 28 % de décès prématuré, selon une étude menée auprès de 500 000 Britanniques de la base de données UK Biobank. Les auteurs estiment qu'à 50 ans, les femmes qui en rajoutent régulièrement ont 1,5 année d'espérance de vie en moins et les hommes 2,28 ans, par rapport à celles et ceux qui ne se servent pas de la salière (4). Par ailleurs, une consommation trop élevée de sel serait la cause de 10 000 décès par jour de maladies cardio-vasculaires en Europe, alerte l'OMS. En revanche, en réduire la consommation de 25 % pourrait sauver 900 000 vies d'ici à 2030 (5).

Réduire le sel a un effet sur l'hypertension artérielle

Les femmes seraient plus sensibles au sel que les hommes et élimineraient moins le surplus dans les urines. Ce phénomène, amplifié à la ménopause, les exposerait alors à un risque d'hypertension artérielle (6). Toutefois, des travaux américains montrent que réduire d'une cuillère à café ses apports quotidiens en **sodium** abaisse d'environ 6 millimètres de mercure(mmHg) la pression artérielle systolique, montrant un effet comparable à celui produit par un médicament antihypertenseur. Diminuer la consommation de sodium serait aussi profitable aux patients déjà traités pour une hypertension, permettant ainsi de préserver leur système cardio-vasculaire (7). Par ailleurs, un régime pauvre en sel améliore les symptômes et la qualité de vie des patients souffrant d'insuffisance cardiaque (8).

Des alternatives plus saines

Composé de chlorure de sodium et de chlorure de potassium, le sel allégé permettrait de réduire de 14 % le risque d'accident vasculaire cérébral (AVC) chez les personnes souffrant d'hypertension artérielle ou celles ayant déjà subi un AVC (9). Le gomasio est également une bonne option pour assaisonner ses plats car ce condiment japonais est composé de 5 % de sel marin et 95 % de graines de sésame broyées. Ou encore le sel de céleri, composé uniquement de céleri-rave séché et broyé. À ne pas confondre avec le sel au céleri, un mélange de sel de table (80 à 90 %) et de graines ou de feuilles de céleri séchées et réduites en poudre. ■

Sylvie Boistard

JACQUES BLACHER Chef du service d'hypertension artérielle de l'Hôtel-Dieu, à Paris

Rééquilibrer le ratio sodium/potassium

« Le sodium est un nutriment essentiel au maintien du volume plasmatique, à la transmission de l'influx nerveux et au fonctionnement normal des cellules. Sans lui, il n'y a pas de vie possible. Toutefois, notre alimentation occidentale tend à nous en apporter en excès. Or, le sodium en surplus participe à la rigidification de la paroi des artères, et donc à l'hypertension artérielle. *A contrario*, le potassium aide à réguler la pression artérielle en favorisant l'évacuation du sodium sanguin. En consommer davantage par les fruits et légumes permet de rééquilibrer le ratio sodium/potassium, favorable à une bonne santé cardio-vasculaire. »

(1) Ministère de l'Agriculture, 2022.

(2) Adding salt to food at table as an indicator of gastric cancer risk among adults: a prospective study, Kronsteiner-Gicevic S. et al, *Gastric Cancer*, 2024.

(3) Transiently Inhibits Mitochondrial Energetics in Mononuclear Phagocytes, Geisberger S. et al, *Circulation*, 2021.

(4) Adding salt to foods and hazard of premature mortality, Ma H. et al, *European Heart Journal*, 2022.

(5) Action on salt and hypertension: reducing cardiovascular disease burden in the WHO European region, OMS, 2024.

(6) Salt Sensitivity of Blood Pressure in Women, Barris C.T. et al, *Hypertension*, 2022.

(7) Effect of Dietary Sodium on Blood Pressure, A Crossover Trial, Gupta D.K. et al, *Jama*, 2023.

(8) Reduction of dietary sodium to less than 100 mmol in heart failure (Sodium-HF), Ezekowitz J. A. et al, *The Lancet*, 2022.

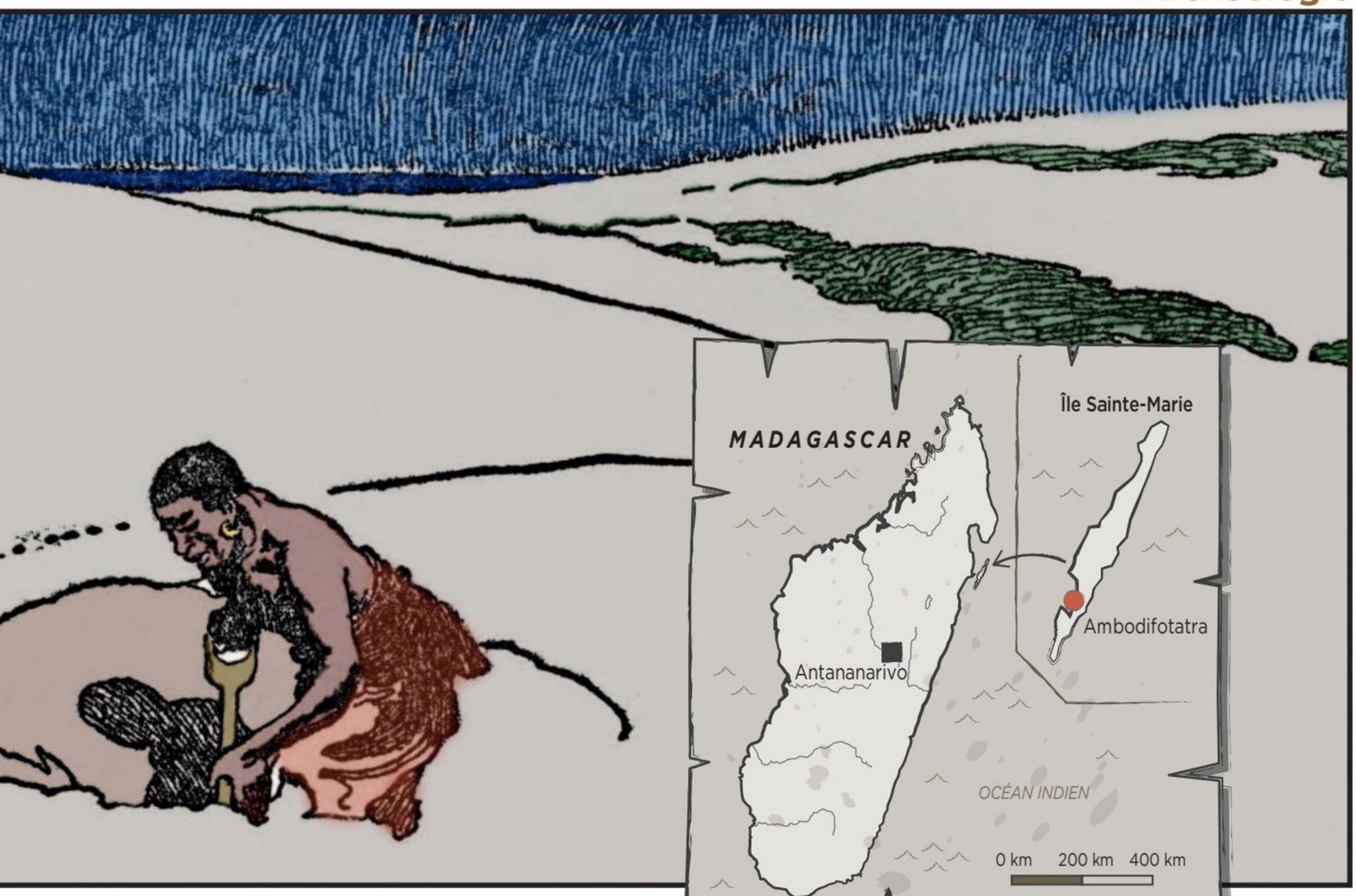
(9) Effect of Salt Substitution on Cardiovascular Events and Death, Neal B. et al, New *England Journal of Medicine*, 2021.

Madagascar

Un exceptionnel repaire de pirates se dévoile

Au large de la côte est malgache, l'île Sainte-Marie a été le campement de forbans aux XVII^e^ et XVIII^e^ siècles. Les archéologues mettent peu à peu au jour d'innombrables vestiges terrestres témoignant de leur activité, mais aussi subaquatiques avec la découverte d'épaves non encore fouillées.

Par Marine Benoit



GIANCARLO COSTA / BRIDGEMAN IMAGES - INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

▲ **L'île Sainte-Marie,** au large de la côte est de Madagascar, est un petit joyau archéologique. Situé sur la route des Indes, c'était un point stratégique de ralliement des pirates dans l'océan Indien et un lieu de transit de leurs marchandises.

Jean Soulat a beau être rentré de l'île Sainte-Marie il y a plusieurs semaines, il n'en revient toujours pas. « *Lorsque vous vous promenez à certains endroits de l'île, il n'y a qu'à se baisser pour ramasser de la porcelaine chinoise rapportée ici par les pirates. "Ça crache", comme on dit en archéologie.* » Cet archéologue au laboratoire privé LandArc, fondateur en 2019 du programme de recherche Archéologie de la piraterie soutenu par les universités de Caen Normandie et de Paris I Panthéon-Sorbonne, se doutait que ce petit bout de terre paradisiaque situé au large de la côte est de Madagascar regorgeait de richesses archéologiques datées d'une période de l'histoire encore relativement insaisissable : celle de l'âge d'or de la piraterie, comprise entre 1680 et 1730. « *Je ne m'attendais pas à trouver tant de choses concentrées sur de si petits périmètres de fouille. C'est un véritable repaire pirate figé dans le temps.* » Ces repaires, nous n'en avons aujourd'hui que peu de traces matérielles, même dans les Caraïbes, qui furent pourtant infestés par les forbans dès le XVIe siècle. Ce sont donc avant tout les archives qui nous indiquent que Port Royal en Jamaïque, Tortuga de mar (île de la Tortue), toute proche de la côte nord-ouest d'Hispaniola (Haïti), ou encore New Providence aux Bahamas ont compté parmi les plus importants d'entre eux.

À l'est de Madagascar, l'île Sainte-Marie, elle, commence tout juste à apparaître comme un petit joyau archéologique : non seulement elle se situe dans l'océan Indien, une zone géographique pour laquelle l'histoire de la piraterie se veut plus confidentielle, mais elle a aussi la particularité unique au monde d'associer des vestiges du passage des pirates tant sur la terre ferme qu'en milieu sous-marin. « *Nous savons qu'ils y avaient installé un fort, des habitations ou encore des entrepôts, mais aussi qu'ils avaient coulé plusieurs de leurs navires dans la baie d'Ambodifotatra, une anse protégée au sud de l'île* », rapporte Jean Soulat. Dès 1690, Madagascar — et tout particulièrement l'île ▶

Sainte-Marie — devient l'un des principaux points de ralliement des pirates, principalement anglais, dans l'océan Indien. « *Madagascar a d'abord une position stratégique, puisqu'elle se situe sur la route des Indes, mais elle a aussi l'immense avantage de ne pas abriter de puissance européenne* », explique Alexandre Audard, historien à l'université Paris Cité et spécialiste de l'histoire de Madagascar. Les pirates peuvent ainsi librement y faire transiter leurs marchandises volées, s'y ravitailler, réparer leurs navires et surtout y attendre durant plusieurs mois que les vents si particuliers de l'océan Indien leur soient favorables.

S.MALARD - J. SOULAT

Un comptoir pour pirates expérimentés

Parce qu'elle est isolée de l'île principale et qu'elle se veut plus salubre que la plupart des ports de la côte est de Madagascar, décimés par le paludisme, l'Île Sainte-Marie va donc devenir rapidement le fief indo-océanique des marins expérimentés ayant fait le choix d'une vie de hors-la-loi. C'est le pirate Adam Baldridge qui y installe le premier, entre 1690 et 1691, un comptoir sous la direction du marchand et armateur new-yorkais Frederick Phillips. Jusqu'en 1697, le port ravitaille plusieurs navires pirates de passage avant que la grande partie des forbans sur place ne soit tuée pour avoir réduit en esclavage une partie de la population locale *(lire l'encadré p. 84)*. Déterminés à conserver ce comptoir à l'emplacement idéal, les pirates reviendront pourtant vite à Sainte-Marie et mettront, pour ainsi dire, de l'eau dans leur rhum. « *Ils vont apprendre à cohabiter avec les Malgaches et certains vont même épouser des femmes malgaches,* détaille Alexandre Audard. *De ces unions vont naître des enfants, nommés* malata *("mulâtres" ou métisses), qui formeront des communautés à part entière.* »

Jean Soulat et son équipe n'ont pas dû fouiller bien longtemps pour trouver des traces de ce passé sulfureux. Il leur a suffi de creuser la terre sur quelques centimètres de profondeur, à seulement 30 mètres du rivage, juste devant le musée local, pour mettre au jour d'innombrables fragments de porcelaine chinoise de la fin de la période Kangxi (1710-1715). À en croire les nombreux

REPRÉSENTATIONS

Une terre mythique dans l'Europe du XVIIIe siècle

Le 7 septembre 1695, entre le Yémen et l'Inde, le pirate anglais Henry Every — appelé aussi « Long Ben » ou le « Roi des pirates » — s'empare du *Ganj-i-Sawai*, navire du souverain de l'Empire moghol, l'un des hommes les plus puissants du monde. À son bord, la fille de l'empereur, sa suite, mais aussi une quantité colossale d'or, d'argent et de pierreries. En Europe, cet événement place sous les projecteurs, comme ne l'ont jamais été les pirates des Caraïbes, ceux de l'océan Indien, que l'on sait installés à Madagascar. « *Parce qu'aucune puissance européenne n'a réussi à coloniser Madagascar au cours des siècles précédents — Portugais, Français et Anglais ont fini à chaque tentative massacrés par les populations locales —, une sorte de mythe de Madagascar naît sur le Vieux Continent au début du XVIIIe siècle* », raconte l'historien Alexandre Audard. En France, en Angleterre ou en Espagne, l'île est décrite comme un territoire gigantesque, foisonnant de richesses et peuplé de créatures fantastiques, à l'instar de géants ou de sphinx. « *On parle surtout d'elle comme*

Les vestiges de la présence des pirates dans la baie d'Ambodifotatra se trouvent aussi bien sur la terre ferme qu'en milieu sous-marin**.** De nombreuses pièces de porcelaine chinoise y ont été mises au jour, tels ce couvercle de gobelet (à gauche) ou cette statuette féminine (ci-dessus).

trous de poteaux également retrouvés, il devait se dresser à cet endroit précis une installation pirate éphémère, sans doute des petits comptoirs de plage destinés à recevoir la marchandise fraîchement déchargée des navires mouillant dans la baie. « *Dans ces trous étaient concentrés des restes de gobelets, de bols, de coupelles et d'assiettes, mais aussi quelques tessons de grès chinois appartenant à des jarres aux dragons, de faïence française et de Delft, en Hollande, ou encore de grès de Westerwald, en Allemagne, tout ceci datant des XVIIe et XVIIIe siècles* », énumère l'archéologue. Cette vaisselle n'est pas le seul témoignage du trafic de biens précieux opéré par les pirates : de nombreux fragments de tuyaux de pipe en terre cuite blanche ont également été déterrés, dont un fabriqué à Glasgow, en Écosse, par le maître pipier James Colquhoun entre les années 1668 et 1730, et un autre à Gouda en Hollande entre 1680 et 1740.

Mais ces petits objets parfaitement datables seraient moins exceptionnels s'ils n'étaient pas associés à une autre découverte d'ampleur à seulement 70 mètres d'eux : l'épave du navire qui les apporta, il y a 300 ans, jusqu'à cette plage isolée du reste du monde. Là encore, il a suffi de vingt minutes de plongée à l'équipe de chercheurs pour localiser les restes de ce que l'on pensait jusqu'ici être le *Fiery Dragon*, navire hollandais dérobé par le pirate William Condon, *alias* Christopher Condent. Gisant dans le port actuel à sept mètres de profondeur, dans un environnement vaseux, le bateau avait déjà été localisé par une équipe américaine de chasseurs de trésors en 2000 et fait l'objet de quelques campagnes de fouilles aux résultats controversés entre 2010 et 2015.

Le navire coulé vers 1720 n'a toujours pas été identifié

« *C'est la première fois qu'il est étudié scientifiquement* », se réjouit Jean Soulat. Enfouie sous un tas de ballasts — ces pierres servant principalement à stabiliser le navire —, l'épave conserve encore une partie de sa coque en bois, miraculeusement protégée par la vase. « *À ce stade, il paraît désormais clair qu'il ne s'agit pas du* Fiery Dragon », statue l'archéologue. Et pour cause : le *Fiery Dragon*, nous disent les textes, était fait de

d'une terre où tout est possible, puisque des pirates y seraient devenus rois », poursuit le spécialiste de l'histoire de l'île.

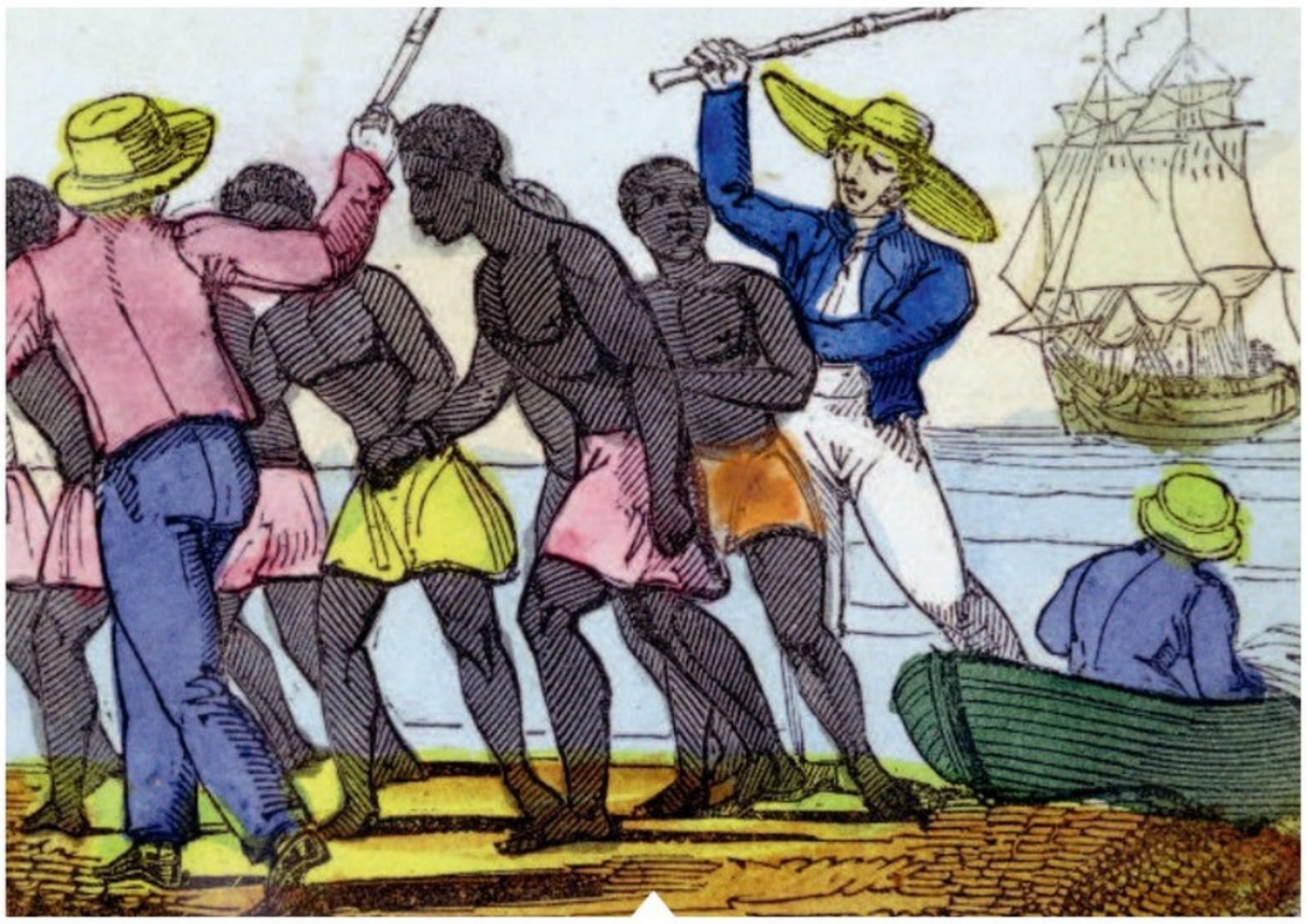
En réalité, la plupart des pirates qui s'y installèrent n'y acquirent aucun pouvoir et se contentèrent de faire l'intermédiaire entre souverains malgaches et marchands européens dans le juteux commerce de l'esclavage. Le « mythe malgache » eut malgré tout la dent dure. Popularisé à travers de nombreux romans et pièces de théâtre, il donna même naissance à un autre mythe plus célèbre : celui de Libertalia, république démocratique de pirates qui aurait été créée au nord de Madagascar et qui est citée dans un ouvrage de 1724, *Histoire générale des plus fameux pirates*. Là encore, il faut démêler le vrai du faux : signé par un certain capitaine Charles Johnson, ce récit est attribué par certains chercheurs à Daniel Defoe, l'auteur de *Robinson Crusoé*.

chêne, comme le veut la tradition hollandaise. Selon les dernières observations, l'ossature de ce navire est en teck. *« C'est la preuve qu'il a été fabriqué en Asie, peut-être par des Anglais ou des Hollandais implantés dans les colonies,* poursuit Jean Soulat. *Mais il pourrait tout aussi bien avoir appartenu et avoir été arraché à une flotte asiatique, auquel cas son étude apporterait des informations extrêmement importantes quant à la tradition des navires asiatiques de cette époque et dont nous ignorons presque tout.* »
Son extraordinaire contenu, lui aussi, pourrait être une mine d'informations : plus de 500 objets, pour la plupart fragmentaires, y ont été dégagés. Parmi eux, une petite monnaie orientale en argent, probablement frappée au Yémen à la fin du XVIIe siècle, des bouteilles en céramique de tradition asiatique, le buste d'une figurine aux traits féminins et, surtout, une grande quantité de cette fameuse vaisselle en porcelaine chinoise de la même période et que l'on retrouve partout sur le rivage. *« Tous ces objets nous permettent d'estimer sans trop de doute la date du naufrage aux années 1720. Mais pour réussir à identifier le nom du navire, il faudra en savoir plus sur la construction de sa coque et son architecture* », affirme l'archéologue.

R. GARNIER

« Il s'agit, peut-être, du premier campement portuaire pirate jamais trouvé dans l'océan Indien »

Jean Soulat, archéologue au laboratoire privé LandArc


HERITAGE IMAGES / BRIDGEMAN IMAGES

Les habitants de l'île furent capturés et vendus comme esclaves par les forbans.

Cinq autres épaves en attente dans la baie malgache

La baie d'Ambodifotatra promet en tout cas encore bien des surprises. Car si cette épave n'est pas celle du *Fiery Dragon*, dont on sait grâce aux documents historiques qu'il fut bel et bien coulé dans la baie en 1721 par William Condon en échange de son amnistie, ce sont non pas quatre, mais cinq épaves pirates qui attendraient encore de révéler leurs secrets. Parmi elles, celle de l'*Adventure Galley* de William Kidd, sabordé en 1698 en raison de son mauvais état, et celles de deux navires coulés en 1699 lors de l'arrivée de navires de guerre anglais, pouvant être identifiés comme le *Mocha* et le *New Soldado*. En 1722, selon l'auteur du journal de bord d'une frégate anglaise, la zone est un véritable cimetière de navires où les mâts et les vergues dépassent encore de l'eau. Si ces derniers ont disparu depuis longtemps, Jean Soulat a obtenu cette année la certitude qu'il y avait encore sous l'eau — et sur terre — de quoi entrevoir pour la première fois à quoi ressemblait un campement portuaire pirate dans son ensemble. *« Le premier, peut-être, jamais trouvé dans l'océan Indien* », risque-t-il du bout des lèvres. Pour sûr, il reviendra fouiller l'an prochain, le temps d'obtenir de nouvelles autorisations et d'organiser cette nouvelle chasse aux trésors pirates. ■

COMMERCE

L'esclavage, une traite lucrative

Madagascar est pour les pirates une base idéale pour faire transiter leurs marchandises, mais l'île a aussi l'immense avantage de leur offrir une ressource abondante : les esclaves, qui ne sont autres que des locaux capturés et envoyés comme main-d'œuvre dans les colonies européennes. Aussi quand la demande en esclaves est au rendez-vous, les forbans n'hésitent pas à trahir certains habitants avec lesquels ils cohabitent. C'est ce que fit en 1697 Adam Baldridge, fondateur de la base pirate de Sainte-Marie. Lorsque la population locale apprit que Baldridge et ses hommes avaient fait embarquer de force hommes, femmes et enfants dans un navire, elle se révolta et égorgea de nombreux pirates.

Japon | EXPO 2025

OSAKA

L'EXPOSITION UNIVERSELLE | 2025

« CONCEVOIR LA SOCIÉTÉ DU FUTUR, IMAGINER NOTRE VIE DE DEMAIN »

3 DÉPARTS

DU 16 AU 23 AVRIL, DU 13 AU 20 JUILLET
DU 21 AU 28 SEPT.

8 JOURS / 6 NUITS
A PARTIR DE **4 590 €** / PERS. (1)

AVEC LA PARTICIPATION EXCLUSIVE DE (2)
DOMINIQUE LEGLU, Directrice éditoriale de SCIENCES et AVENIR
et **MME CECILE ASANUMA BRICE***, Chercheuse en sociologie urbaine

L'IMMENSE TOKYO, LA MERVEILLEUSE KYOTO ET L'ÉTOURDISSANTE EXPOSITION UNIVERSELLE D'OSAKA

C'est à la découverte des richesses du pays du Soleil Levant que vous invite ce voyage de Tokyo à la merveilleuse Kyoto, en passant par Osaka. Avec l'intervention, lors de notre visite au Pavillon français de l'exposition universelle, d'une conférencière de tout premier plan, **Mme Cécile Asanuma Brice***, du CNRS, qui réside au Japon depuis plus de vingt ans. Lors de deux journées entières à Tokyo, nous découvrirons le cœur historique de la ville impériale, le quartier populaire d'Asakusa, et l'immensité de la métropole avec ses 37 millions d'habitants. En montant à la spectaculaire tour Skytree, conçue par l'architecte Kiichi Sumikawa, c'est un panorama à 360°, au-delà de tous les buildings, qui s'offre à tous... Deux journées prévues à Osaka permettront ensuite non seulement de visiter le pavillon français - mais de nombreux autres pavillons de cette exposition universelle réunissant pas moins de 160 pays, sur le thème « Concevoir le futur, imaginer notre vie de demain ». Thème particulièrement évocateur pour Sciences et Avenir - La Recherche et tous ceux qui se passionnent pour l'évolution actuelle de l'Asie. Nous pourrons ensuite visiter quelques merveilles de Kyoto classées au patrimoine de l'Unesco, dont le Pavillon d'Or, deux fois ravagé par des incendies mais reconstruit. Et le temple bouddhiste Ryoan-J, au pied de la montagne Kinugasa-yama, à l'extraordinaire jardin de pierres. Sans négliger des déjeuners et dîners permettant d'apprécier de délicieux sushis, l'émerveillement est garanti.

Dominique LEGLU

Dr Dominique Leglu, directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche, pôle Sciences du groupe Challenges.

Mme Cécile Anuma Brice, chercheuse en sociologie urbaine.

UN ÉVÈNEMENT EXCLUSIF

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

MYCOMM.

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur
pavillonfranceosaka2025.mycomm.fr/sav
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | experiences@mycomm.fr

(1) Voir détails sur la brochure (2) Sous réserve de disponibilité * Intervenante présente qu'en avril et en septembre

Graph. Atelier Pascale M (26) - Montage photos : Japonaise Freepik / Torii - Rafael Hoyos Weht Unsplash

Rosalind Franklin, une pionnière de l'ADN

La physicochimiste britannique a apporté une contribution majeure à la découverte de la structure de l'ADN, grâce à une image très précise mettant en évidence la double hélice. Une découverte qui profitera à Jim Watson, Francis Crick et Maurice Wilkins, nobélisés en 1962.

Par Michel Morange

En 1962, le prix Nobel de physiologie ou médecine était attribué à Francis Crick, Jim Watson et Maurice Wilkins pour la mise en évidence de la structure de l'ADN, la molécule support de l'hérédité. Jim Watson et Francis Crick avaient élaboré le modèle en double hélice de cette molécule. Et Maurice Wilkins avait obtenu, en envoyant un faisceau de rayons X sur des fibres d'ADN, des clichés de diffraction fournissant des informations sur sa forme. Une quatrième personne, Rosalind Franklin, aurait pu aussi être distinguée car ses clichés étaient de meilleure qualité que ceux de Maurice Wilkins. Mais elle était morte d'un cancer en 1958, cinq ans après la découverte.

Ce n'est pas l'attribution du Nobel qui suscita la polémique, mais la publication par Jim Watson, en 1968, d'un ouvrage décrivant les « dessous » de ces travaux décisifs. Il révélait que Francis Crick et lui-même n'avaient jamais effectué une seule expérience sur l'ADN, et qu'ils avaient eu accès aux clichés de Rosalind Franklin et à ses conclusions sans qu'elle n'en ait jamais eu connaissance. Le pire était que, au lieu de reconnaître son apport, Jim Watson en dressait un portrait tout à fait défavorable, à la fois physiquement et pour son caractère jugé agressif. Il suggérait, en outre, qu'elle n'aurait jamais été capable d'interpréter les informations contenues dans ses clichés.

F. MANTOVANI/OPALE PHOTO/ LEEXTRA

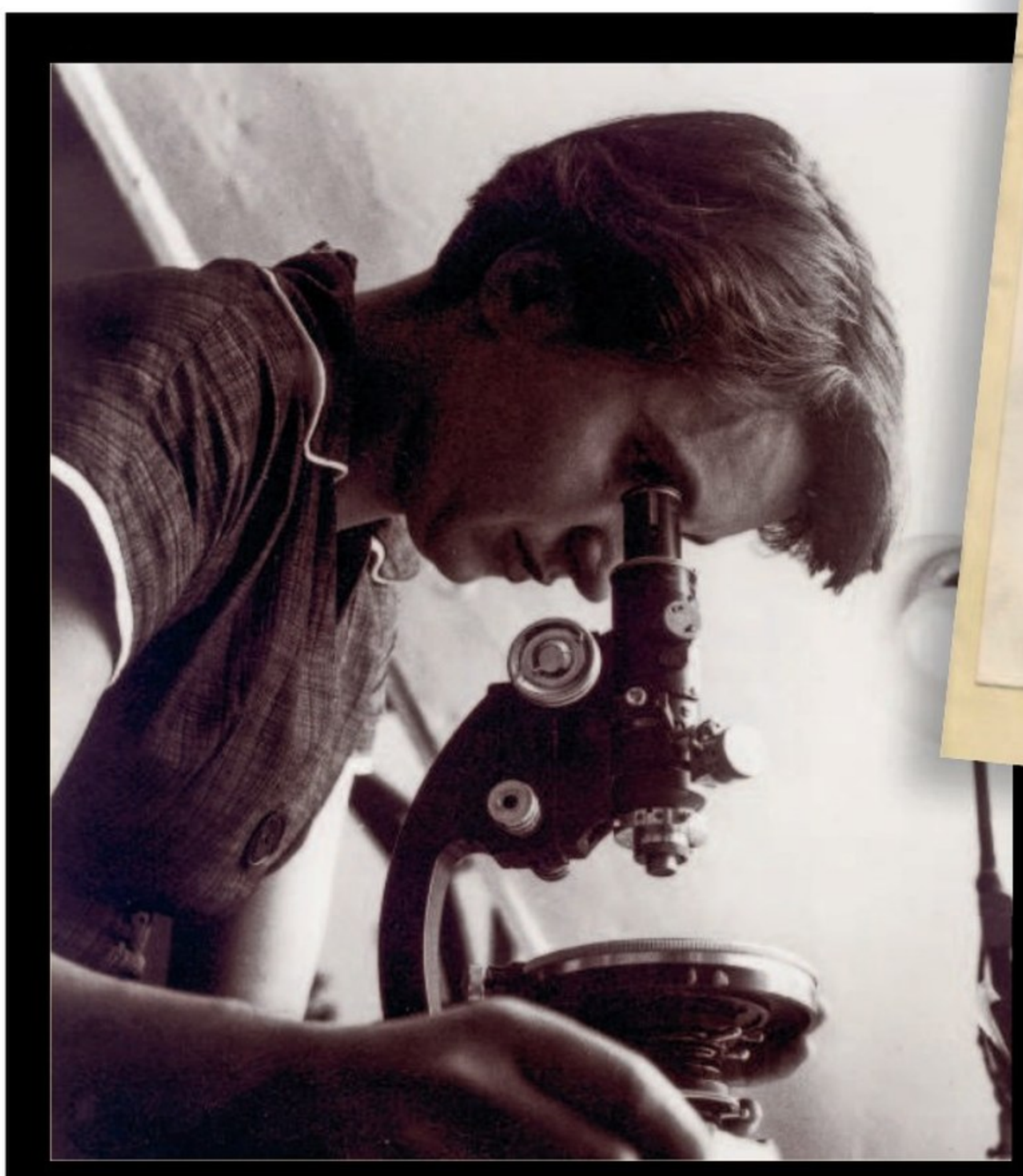
Professeur émérite de biologie, Michel Morange est membre associé de l'Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques (IHPST).

Naquit ainsi une légende noire, faisant de Rosalind Franklin la victime de mâles agressifs dans le milieu machiste de la recherche, mais aussi la véritable découvreuse de la structure de l'ADN.

Un article publié en 2023 dans le journal *Nature* apporte une nouvelle interprétation. Il montre que tous les participants ont été associés à la découverte de l'ADN, et qu'aucun, même Rosalind Franklin, ne s'en est senti injustement écarté. Quant au livre de Jim Watson, il ne doit pas être vu comme la révélation d'une vérité cachée sur le milieu de la recherche, mais comme le désir de son auteur d'attirer des lecteurs avides de scandale.

Revenons donc sur l'histoire de cette avancée scientifique. L'origine, si tant est qu'il soit possible d'en donner une, était un article de 1944 d'Oswald Avery présentant l'ADN comme le constituant des gènes, ce qui avait entraîné des recherches visant à déterminer la structure de cette molécule. Le chimiste américain Erwin Chargaff avait montré que les quatre bases azotées de l'ADN — adénine (A), thymine (T), guanine (G), cytosine (C) — étaient en proportions variables, mais que les quantités de A et de T étaient toujours égales, tout comme celles de G et de C. La raison restait toutefois ignorée.

Pour l'expliquer, la diffraction des rayons X (la déviation de ces rayons lorsqu'ils traversent des



En mai 1952, Rosalind Franklin obtient une image de la structure de l'ADN, en utilisant la diffraction par rayons X, qui deviendra le fameux cliché 51. Il met en évidence la double hélice de l'ADN.

© ANN RONAN PICTURE LIBRARY / PHOTO12 / AFP - AKG IMAGES

cristaux) joua un rôle majeur. Ce phénomène était étudié depuis le début du XX^e siècle, et l'on savait que l'analyse des images de diffraction révélerait, au prix de calculs complexes, la structure des molécules présentes dans les cristaux. Le laboratoire de Lawrence Bragg à Cambridge (Royaume-Uni), où travaillaient Jim Watson et Francis Crick, avait été le berceau de cette technique. Mais d'autres centres de recherche britanniques l'utilisaient également, comme celui de John Randall et Maurice Wilkins au King's College de Londres.

Des relations qui se dégradent en raison d'un non-dit

Une spécialiste de la diffraction des rayons X, Rosalind Franklin, fut recrutée en 1950 par John Randall, le directeur du laboratoire, pour travailler sur l'ADN. Dans une lettre qu'il lui adressa peu avant son arrivée, John Randall lui proposa de poursuivre les recherches menées sur cette molécule avec Raymond Gosling, un des étudiants de Maurice Wilkins, afin que ce dernier puisse consacrer tout son temps à un autre projet de recherche en microscopie. Maurice Wilkins, qui avait déjà obtenu d'excellentes images de diffraction de l'ADN, n'avait pas l'intention d'abandonner ces travaux. Mais John Randall n'avait pas informé Maurice Wilkins du contenu de sa lettre. Avait-il cru que ce dernier souhaitait arrêter son travail sur l'ADN, avait-il été poussé par sa hiérarchie trouvant que le projet de microscopie n'avançait pas assez vite, ou s'intéressait-il lui-même à l'ADN en espérant pouvoir y participer plus facilement avec Rosalind Franklin ? Inconscient de ce problème, Maurice Wilkins fit, six mois après l'arrivée de Rosalind Franklin, un exposé à Cambridge sur la structure de l'ADN. La chercheuse, qui avait assisté à ce séminaire, lui dit abruptement à son issue qu'il devait maintenant lui laisser ce sujet. Maurice Wilkins n'en avait pas l'intention, et alors que ses relations avec Rosalind Franklin avaient été jusqu'alors cordiales, elles devinrent du jour au lendemain inexistantes ou, pis, exécrables.

Après avoir remplacé le générateur de rayons X et la caméra, Rosalind Franklin obtint des images de très grande qualité. Elle put alors clairement distinguer deux formes d'ADN : la forme « A » lorsque le taux d'humidité était faible et la forme « B » à

POUR EN SAVOIR PLUS

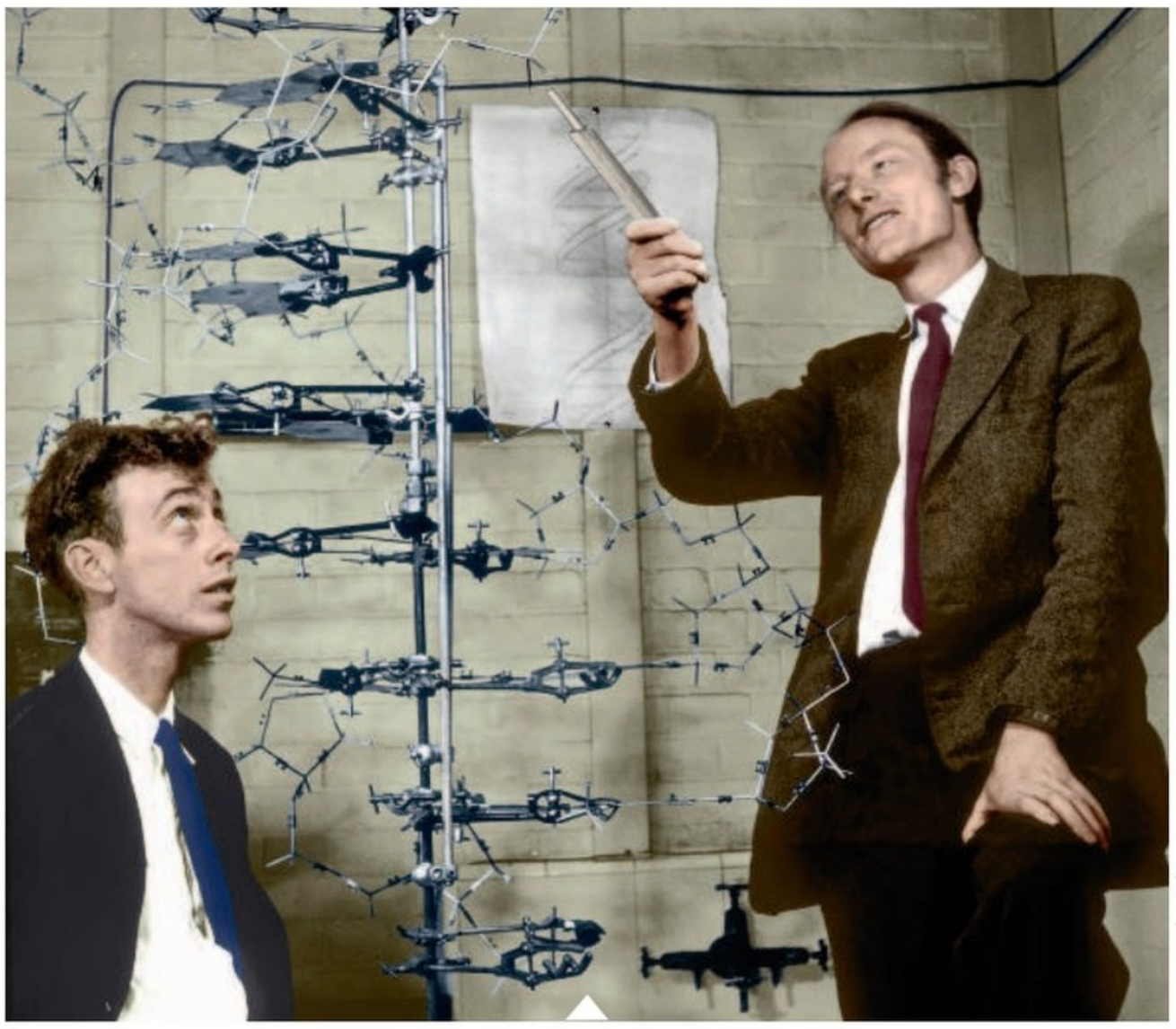
L'étude sur la contribution de Rosalind Franklin à la découverte de la structure de l'ADN, parue dans *Nature* en avril 2023 : **sciav.fr/932Franklin**

taux élevé. En 1952, Rosalind Franklin produisit des clichés de la forme B encore plus nets. De son côté, Maurice Wilkins put démontrer qu'une ou plusieurs hélices donnaient une image de diffraction semblable à celle de la forme B. Ceci conduisit Jim Watson et Francis Crick à tenter d'élaborer un modèle de l'ADN contenant trois chaînes s'enroulant en hélice les unes autour des autres. Non seulement Rosalind Franklin montra qu'ils avaient fait de grossières erreurs, mais John Randall fut furieux de cette concurrence, et Lawrence Bragg dut interdire à Jim Watson et Francis Crick de travailler sur l'ADN.

Le nouveau modèle montre la structure hélicoïdale formée de deux brins

De nombreuses questions demeuraient : combien de chaînes contenait l'hélice révélée par les expériences de diffraction ? Dans quel sens couraient-elles ? Où étaient les bases et les phosphates, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'hélice ? Rosalind Franklin pensa d'abord que la forme A n'était pas une hélice, et que la forme B, qui était bien une hélice, était une forme « anormale » apparaissant en excès d'humidité (alors qu'elle est la forme de l'ADN dans les cellules).

Tout changea au début de 1953. Alors que Rosalind Franklin décida de rejoindre un autre laboratoire, laissant à Maurice Wilkins ses résultats, le grand chimiste américain Linus Pauling, réputé pour son travail sur la structure des protéines, construisit un modèle de l'ADN. Jim Watson et Francis Crick en eurent une copie avant sa publication et virent aussitôt que le modèle ne pouvait être exact. Néanmoins, ils craignirent que Linus



SPL/SUCRÉ SALÉ

Jim Watson et Francis Crick présentent leur modèle de la structure de l'ADN à l'université de Cambridge (Royaume-Uni) en mai 1953.

Pauling ne corrige rapidement ses erreurs. Lawrence Bragg s'était vu doublé deux ans plus tôt par celui-ci, et ne souhaitant pas que cela se reproduise, il permit à nouveau à Jim Watson et Francis Crick de travailler sur l'ADN. Ils invitèrent Maurice Wilkins pour lui annoncer qu'ils avaient décidé de construire à nouveau un modèle de l'ADN, et un mois plus tard ils le firent venir pour contempler celui que nous connaissons aujourd'hui : une hélice formée de deux chaînes en sens opposés, déduite des derniers clichés obtenus par Rosalind Franklin. Celle-ci vint quelques jours plus tard voir le modèle, et n'y trouva rien à redire.

Le 25 avril 1953, trois articles furent publiés simultanément : le modèle de Jim Watson et Francis Crick, un article de Maurice Wilkins et un autre de Rosalind Franklin. Deux mois plus tard, tous les auteurs se retrouvèrent à Londres pour célébrer la découverte de la structure de l'ADN issue de l'ensemble de leurs travaux.

Les auteurs de l'étude parue l'année dernière dans *Nature* appuient leur réévaluation de toute l'affaire sur des documents inédits de Rosalind Franklin trouvés à l'université de Cambridge. En réalité, l'ouvrage autobiographique publié par Maurice Wilkins en 2003 avait déjà apporté la plupart des informations que l'on y trouve. Il est

RÉCOMPENSE

Une découverte collective

Rosalind Franklin eut en général de bonnes relations avec ses collègues : la « furie » dessinée par Jim Watson dans son livre n'existait pas. Réciproquement, ni Maurice Wilkins, ni Jim Watson et Francis Crick — les trois lauréats du prix Nobel pour la découverte de la structure de l'ADN — ne commirent de faute éthique en utilisant les résultats de ses expériences : on peut juste leur reprocher de ne pas lui en avoir parlé directement. Cette découverte ne fut pas le résultat d'une collaboration mais d'un travail collectif. Ceci n'empêcha pas les regrets de Maurice Wilkins qui resta convaincu que sans John Randall, il aurait pu obtenir seul le Nobel. Rosalind Franklin ne reçut pas non plus ce prix, celui-ci n'étant jamais attribué *post mortem*. L'aurait-elle obtenu ? Il y aurait eu une difficulté car le Nobel n'est jamais donné à plus de trois personnes.

faux de croire que l'histoire progresse toujours par la découverte de nouveaux documents, alors que c'est souvent un changement de perspectives qui permet d'avancer.

Le rôle majeur des relations sociales dans la construction de la connaissance

Une autre leçon est qu'il faut se méfier d'une sociologie « à la tronçonneuse » faisant appel à des catégories générales : rapports hommes-femmes, relations de pouvoir, etc. Ce n'est pas pour autant que les relations sociales ne jouent pas un rôle majeur dans la construction de la connaissance scientifique. L'isolement de Rosalind Franklin, en partie involontaire mais peut-être aussi lié à sa personnalité, explique qu'elle n'ait pas pu échanger autant avec d'autres chercheurs que Jim Watson et Francis Crick, qui ont pu ainsi, lors de la construction de leur modèle, avoir accès à des informations essentielles sur la structure des bases et les liaisons entre celles-ci.
Une autre différence entre Rosalind Franklin, Jim Watson et Francis Crick est la place donnée à la diffraction des rayons X. Pour la première, elle permettait seule d'obtenir la structure, avec du temps et une augmentation des capacités de calcul des ordinateurs. Pour les seconds, elle apportait des informations qui devaient être complétées par la construction de modèles, comme l'avait fait avec succès Linus Pauling pour la structure des protéines. Rosalind Franklin disait qu'elle ferait un modèle quand elle connaîtrait la structure, alors que Jim Watson et Francis Crick construisaient leur modèle pour découvrir la structure.
Une conclusion à tirer de cet épisode est aussi que la construction de la connaissance scientifique n'est pas un assemblage de connaissances sûres, mais un processus qui démarre avec des éléments dont la valeur est encore incertaine : dans le cas de l'ADN, le nombre de chaînes, leur orientation, la position des bases ou la manière dont elles interagissaient étaient ignorés. Très peu des informations acquises antérieurement étaient assez sûres pour guider le travail de construction du modèle. Par contre, lorsque ce dernier fut achevé, il fut facile de vérifier qu'il était en accord avec certaines des observations faites par Erwin Chargaff ou Rosalind Franklin. ■

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 923
L'évangile oublié qui bouleverse la Bible

N° 924 Dépression : les nouvelles pistes pour s'en sortir

N° 925 Énergie noire : la force qui déchire l'Univers

N° 926 Nouveaux traitements pour vaincre l'insomnie

N° 927 Univers : la première seconde

N° 928
La France à +4 °C
Ce qui va changer

N° 929/930
20 questions qui obsèdent les scientifiques

N° 931
La molécule miracle

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 923 ❑ N° 924 ❑ N° 925 ❑ N° 926
❑ N° 927 ❑ N° 928 ❑ N° 929/930 ❑ N° 931

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

TRANSVERSALES

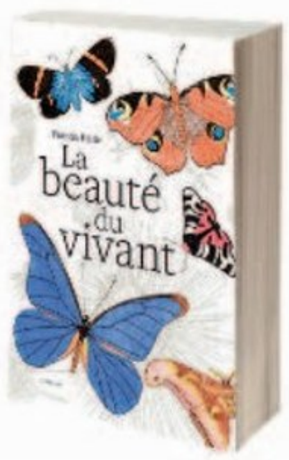
Les illustrations de Francis Hallé affichent sa vision haute en couleur du vivant.

Par amour du beau

Le botaniste Francis Hallé se lance en quête de la beauté dans la nature qui témoigne du « fonctionnement optimal d'un être vivant ».

FRANCIS HALLÉ

ESTHÉTIQUE La beauté s'apprend et se cultive. Elle n'est pas quantifiable, ne se laisse pas emprisonner facilement dans des définitions sans appel, mais s'épanouit dans la relation entre l'observateur et l'objet observé. Le botaniste Francis Hallé caressait depuis longtemps l'idée : se lancer en quête de la beauté du vivant. Dans ce livre, « *amusant et joyeux, car la beauté et la vie n'ont rien à voir avec l'ennui, la tristesse, la monotonie* », il esquisse un historique de la caractérisation du beau et s'attaque à des questions devenues cruciales au fil de sa brillante et singulière carrière : pourquoi les scientifiques se taisent-ils au sujet de la beauté ? Elle serait futile, déplore-t-il, alors que tourner le dos à l'esthétique éloigne le public des sciences. Comme la biologie moléculaire a éloigné les chercheurs du terrain, constate-t-il. Mais qu'est-ce que la beauté ? A-t-elle un sens biologique ? À ces interrogations, il répond d'abord par… la beauté. Dans les pages élégamment illustrées de sa main, prennent vie coquillages et poissons hauts en couleur, insectes et mammifères, feuilles, arbres et forêts, qui émerveillent tout en donnant forme à une pensée. Francis Hallé associe la théorie de la sélection naturelle de Charles Darwin à l'idée d'un chemin évolutif vers la beauté, entrepris par le vivant depuis ses formes ancestrales vers les plus accomplies et plus efficaces, en établissant un lien entre le perfectionnement et l'esthétique : « *La beauté témoigne du fonctionnement optimal d'un être vivant* », conclut le botaniste, indécrottable amoureux du beau ! ■ **Andreina De Bei**



La Beauté du vivant, Francis Hallé, Actes Sud, 160 p., 36 €.
En librairie le 16 octobre.

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 92
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Le ciel du mois p. 97
▶ Jeux p. 98

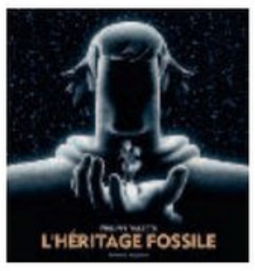
Radioscopie de la famille

BD Le dessinateur Terreur Graphique embarque l'historien et anthropologue français Emmanuel Todd dans un voyage en BD qui va nous entraîner de l'Angleterre au Japon. Ce récit drôle et didactique nous explique comment les divers systèmes familiaux (nucléaire égalitaire ou inégalitaire, souche) *« façonnent les sociétés comme un inconscient politique, économique, éducatif… »* et déterminent des valeurs culturelles fondamentales, qui se reflètent ensuite dans les institutions et les choix politiques des sociétés. ■ **S. R.**

Il était une fois la famille, Terreur Graphique, Emmanuel Todd, Casterman, 112 p., 23 €

Vivre sur une exoplanète

BD Reiz, un vieil astronaute, et son fils Nova cheminent sur une planète désertique. 20 000 ans auparavant, l'équipage du père a quitté une Terre inhospitalière pour fonder une colonie sur une exoplanète. Mais, tout ne s'est pas déroulé comme prévu… Mélange de dessins classiques

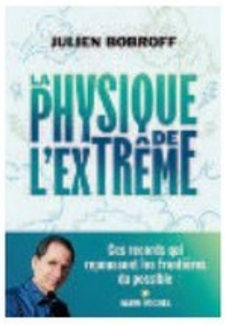


et de graphismes numériques, le périple des deux héros se révèle riche en rebondissements autant qu'en réflexions philosophiques sur le devenir de l'humanité. Cette incursion dans la science-fiction d'un auteur jusque-là abonné aux séries comiques est une réussite. ■ **H. R.**

L'Héritage fossile, Philippe Valette, Delcourt, 285 p., 29,85 €

Records de labos

PHÉNOMÈNES Avec sa verve habituelle, Julien Bobroff explore les records établis par les scientifiques afin d'étudier les lois de la physique dans leurs retranchements. Notre préféré : le champ magnétique



le plus puissant, 1200 teslas, produit à l'université de Tokyo, au Japon, en 2018. Le précédent record a été pulvérisé d'un facteur 10 mais le laboratoire aussi, sans faire de victimes ! ■ **F. N.**

La Physique de l'extrême, Julien Bobroff, Albin Michel, 208 p., 21,90 €

Fascinante vache de mer

ÉPOPÉE *« Des ombres de trente pieds vont et viennent sous la surface — quelles bêtes incroyables, magnifiques ! »* Un animal s'approche de la barque et lorsqu'il sort la tête

de l'eau, les marins et le naturaliste Georg Wilhelm Steller découvrent avec stupeur une sirène qui *« les salue avec de tendres yeux bigleux »*. C'est ainsi que l'universitaire finlandaise relate la première recension, en 1741, de l'existence d'une vache de mer géante, la « rhytine de Steller », qui vivait alors dans les eaux arctiques. Décimée pour sa chair, elle disparaît en 27 ans ! Ce récit passionnant nous entraîne ensuite, avec les hommes et les femmes mêlés au fil des siècles à l'aventure, à la recherche de son squelette jusqu'à son exposition au musée d'Histoire naturelle d'Helsinki, en Finlande. ■ **S. R.**

À la recherche du vivant, Iida Turpeinen, Autrement, 304 p., 22,50 €

L'IA par le menu

PÉDAGOGIE Début avril 2023, à la demande d'une professeure de français, le spécialiste d'intelligence artificielle et chroniqueur pour *Sciences et Avenir* Jean-Gabriel Ganascia reçoit quatre élèves de troisième qui s'apprêtent à traiter de l'intelligence artificielle (IA) dans le journal de leur collège. Ce livre retranscrit ces échanges, structurés autour des questions des collégiens. Le contenu est loin d'être basique, bien au contraire. Dans le souci de clarifier la notion d'IA, d'évacuer les raccourcis ou les malentendus, le chercheur va très loin dans la précision du propos, qu'il s'agisse d'évoquer la voiture autonome, le Web, la formule « réseau de neurones » ou l'intelligence tout court. De leur côté, les adolescents sont venus avec des interrogations souvent anglées, montrant l'ampleur de leurs recherches en amont : IA et diagnostic, IA et création musicale, faillibilité de l'IA, etc. Cet essai n'est pas une encyclopédie ni une série de définitions, mais une discussion dont l'intérêt est de montrer que l'IA est loin de se résumer à ChatGPT. ■ **Arnaud Devillard**

L'IA expliquée aux humains, Jean-Gabriel Ganascia, Seuil, 168 p., 13,50 €

Une épopée humaine et climatique

ARCHIVES L'histoire est aussi climatique. Celle-ci possède ses propres documents d'archives, « gravés » dans les sols et dans l'environnement, et dont l'exploitation par les scientifiques, pour certains, est récente : les anneaux de croissance des arbres, l'accumulation de dépôts minéraux, ou encore les graines carbonisées et desséchées. Ces « archives climatiques » sont aussi une clef indispensable pour appréhender de manière plus complète l'histoire des interactions entre l'humain et le monde naturel. L'historien Peter Frankopan s'en empare dans cet ouvrage aux allures de somme (près de 1000 pages). Celui-ci ne prétend pas à l'exhaustivité mais, en cherchant toujours à éviter les simplifications excessives, il fait une formidable œuvre de synthèse à destination du grand public. Ce tourbillon d'informations, aussi solidement documenté que dynamiquement mis en mots, ouvre de fécondes perspectives sur l'histoire des sociétés humaines et de leur environnement, à toutes les périodes et dans toutes les régions du monde. Épique. ■ **Vincent Glavieux**

Les Métamorphoses de la Terre, Peter Frankopan, Tallandier, 990 p., 31,90 €

C'EST À VOIR

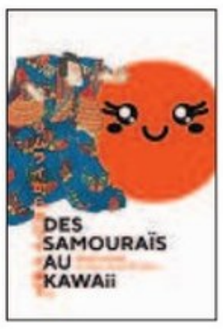
EXPOSITIONS

Alise-Sainte-Reine (21)

Archéologie et sport
Tous les ans, un espace créé avec l'Inrap est dédié à la découverte des métiers de l'archéologie. Pour la saison 2024, il accueille une exposition où les vestiges archéologiques témoignent de l'activité physique des humains depuis la préhistoire.
MuséoParc Alésia, 1, route des Trois-Ormeaux, jusqu'au 30 novembre. Rens. : 03.80.96.96.23.

Bordeaux (33)

Littoral aquitain
À la fois outil de décryptage et relais des sites naturels de la région, ce parcours traite des paysages, de la faune, de la vie marine et de l'impact des activités humaines sur ce que l'on nomme parfois la *« plus grande plage d'Europe »*.
Muséum de Bordeaux, 5, place Bardineau, jusqu'au 31 janvier 2025. Rens. : 02.24.57.65.30.



Daoulas (29)

Des samouraïs au kawaii
Cette exposition explore l'histoire croisée du Japon et de l'Occident du XVIe siècle à nos jours, les influences réciproques, les ruptures, les échanges entre ces deux parties du monde. Des pièces d'art japonais ont été prêtées par le musée des Confluences de Lyon.
Abbaye de Daoulas, 21, rue de l'Église, jusqu'au 1er décembre. Rens. : 02.98.25.84.39.

Lattes (34)

Senteurs célestes, arômes du passé
Des sources archéologiques et historiques ainsi qu'une centaine d'œuvres et des dispositifs sensoriels présentent les substances aromatiques utilisées dans l'Antiquité méditerranéenne en Égypte, en Grèce et en Étrurie.
Site archéologique Lattara - musée Henri-Prades, 390, avenue de Pérols, jusqu'au 3 février 2025. Rens. : 04.99.54.78.20.

DAVID MORGANTI

Rouen (76) / Musée

Cité immersive viking

Ce projet a pour vocation de *« repenser la manière dont on voit un musée d'histoire, dont on conçoit l'expérience du visiteur »*, annonçait Jean Vergès, président et fondateur de la Cité immersive viking. Présenté à l'automne 2023, ce nouveau lieu a ouvert le 15 juin en partant du constat qu'aller au musée est souvent perçu par le grand public comme une activité élitiste. Focalisé sur l'histoire des Vikings en Normandie entre les IXe et Xe siècles, le concept promet une *« expérience sensorielle »* à base de sons, de décors, d'ambiances lumineuses, et même une implication physique comme dans un *escape game*. *« Nous sommes aussi là pour faire le récit d'un patrimoine, de personnages, avec une production audiovisuelle qui va reprendre les codes de la narration, en restant attaché aux sources historiques. »* Le parcours est conçu sous la direction scientifique de Vincent Samson, spécialiste de la Scandinavie ancienne à l'université de Strasbourg. Le visiteur déambule à son gré, confronté à l'expérience des raids vikings, des campements, de la conquête de l'Angleterre… ■ **Arnaud Devillard**

Hangar, 105 bis, allée François-Mitterrand. Rens.: sciav.fr/932viking

Lyon (69)

Épidémie. Prendre soin du vivant
L'impact des grandes épidémies (Covid-19, variole, choléra, grippe espagnole, sida) sur notre histoire est expliqué par le biais de collections d'ethnographie, de médecine et d'histoire naturelle.
Lire notre reportage : sciav.fr/928diapo
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 16 février 2025. Rens. : 04.28.38.12.12.

Nemours (77)

Le propulseur
Cette arme destinée à envoyer une sagaie apparaît il y a 22 000 ans. Elle sert à la chasse, à la pêche, à la guerre, partout dans le monde. Des moulages et des objets racontent son histoire.
Musée de Préhistoire d'île-de-France, 48, avenue Étienne-Dailly, jusqu'au 30 décembre. Rens. : 01.64.78.54.80.

Paris (75)

Colloque en l'honneur d'Hubert Reeves
Colloque consacré à Hubert Reeves, « le scientifique, le vulgarisateur, l'humaniste, l'écologiste », décédé en 2023.
CNRS, auditorium du campus Gérard-Mégie, 3, rue Michel-Ange, le 18 octobre de 9 h à 19 h. Programme et inscriptions : https://www.iap.fr/HReeves_cnrs2024

Silex and the city
La série de bandes dessinées de Jul, située durant la préhistoire, alimente une exposition mettant en avant des objets de la collection du musée. Un lien est tissé entre contenus des albums et connaissances scientifiques.
Musée de l'Homme, 17, place du Trocadéro, jusqu'au 29 décembre. Rens. : 01.44.05.72.72.

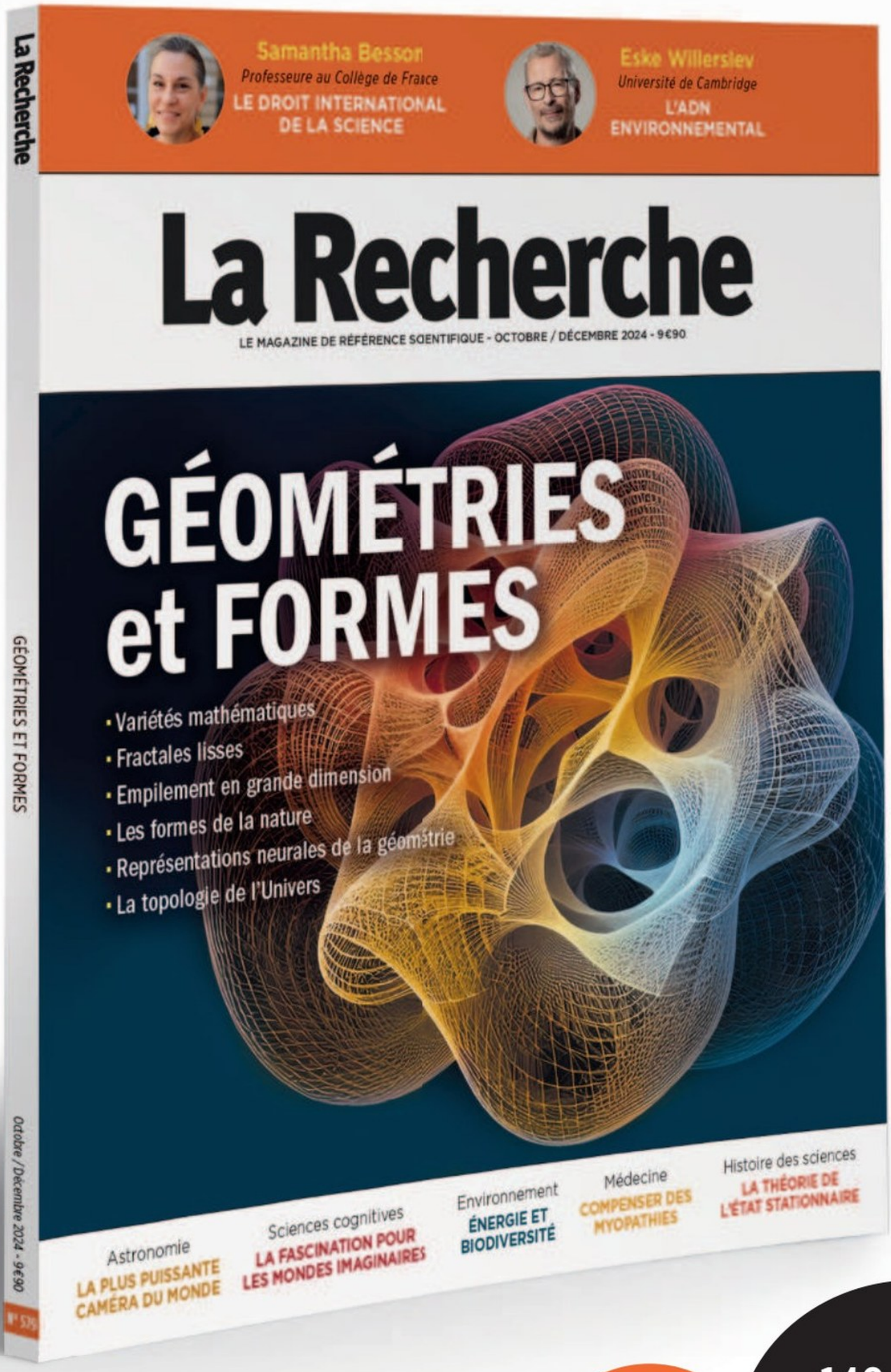
Toulouse (31)

Géants
C'est l'histoire de huit spécimens d'animaux de grande taille mais méconnus, remontant au Cénozoïque. Il est question notamment du *Gigantopithecus blacki*, un singe asiatique, ou du *Gastornis laurenti,* un oiseau incapable de voler.
Muséum, 35, allées Jules-Guesde, du 8 octobre 2024 au 29 juin 2025. Rens. : 05.67.73.84.84.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

18 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

L'action climatique au cœur des élections américaines ?

Les élections américaines approchent et leur issue pourrait avoir de grandes conséquences pour les émissions de gaz à effet de serre, américaines et mondiales, entre bien d'autres répercussions. Si les émissions territoriales américaines sont maintenant à un niveau inférieur de 16 % à leur pic de 2005, le pays n'en reste pas moins le deuxième émetteur mondial et le premier contributeur historique au cumul des émissions dans notre atmosphère. Les politiques climatiques fédérales sont de nature à influencer les émissions du pays, mais aussi à avoir des effets d'entraînement au-delà des frontières nationales. En 2022, dans le cadre de l'Inflation Reduction Act (IRA), environ 400 milliards de dollars ont été engagés sur dix ans pour subventionner les énergies bas carbone, soutenir des mesures d'électrification, réduire les émissions de méthane, promouvoir l'industrie bas carbone nationale et favoriser la justice environnementale. Les études estiment que ces mesures amèneraient les émissions américaines en 2030 à un niveau de 33 à 40 % inférieures à celui de 2005. C'est encore trop peu pour atteindre l'objectif annoncé dans le cadre de l'accord de Paris de 50-52 % de réduction. Mais cela représente près de 2 milliards de tonnes équivalent CO_2 évitées d'ici à 2030. Ce sont des États-Unis plus engagés dans la coopération internationale face au changement climatique dont le monde a besoin, pas d'un recul. Si l'action climatique a été absente des débats publics avant les législatives en France, jouera-t-elle un rôle outre-Atlantique ? ■

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER/ HANS LUCAS

MATHS PAR SYLVIE BENZONI-GAVAGE

Manipuler mentalement des formes mathématiques

Faut-il voir pour faire des maths ? Chez les enfants manipulant des formes ou comptant sur leurs doigts, la découverte des mathématiques passe par le toucher. Puis, à l'école, on écrit des calculs, on dessine des figures. L'apprentissage est bien plus visuel que manuel. Aussi les adaptations pour élèves non voyants demandent des efforts particuliers de concentration. Qu'en est-il des personnes non voyantes dans le domaine de la recherche mathématique ? Là aussi, adaptation et concentration sont nécessaires. Peu nombreux, des mathématiciens aveugles se distinguent par leurs capacités à imaginer ce que personne n'avait « vu » avant eux. Ce fut le cas du Français Louis Antoine (1888-1971), créateur du « collier d'Antoine », objet fractal grâce auquel il a démontré une propriété surprenante de notre espace à trois dimensions. Plus près de nous, c'est un autre mathématicien français aveugle qui a trouvé un « retournement de la sphère ». Ceci aussi défie notre intuition visuelle. Imaginez une sphère faite dans un genre de tissu élastique capable de se traverser lui-même sans se percer. Pouvez-vous mentalement retourner cette sphère pour que son intérieur se retrouve à l'extérieur et *vice versa*, le tout sans couper, ni plier, ni pincer le tissu ? Bernard Morin (1931-2018) a résolu cette énigme, allant jusqu'à fabriquer des modèles en argile pour faire comprendre à ses collègues ce qu'il avait en tête. Qui a dit handicap ? ■

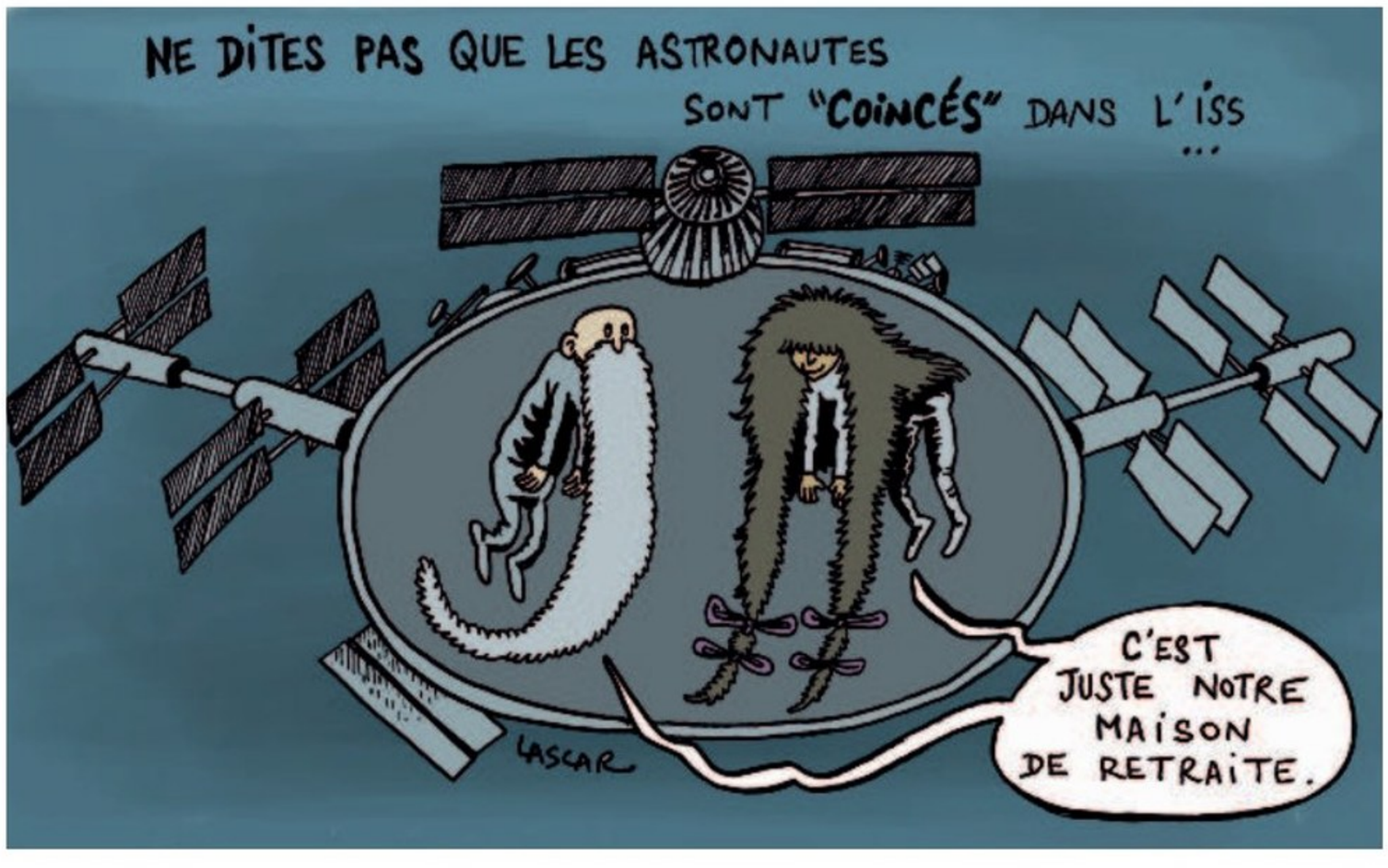
ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Ce que disent les chiffres… et ce qu'ils taisent

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

Les chiffres parlent, dit-on souvent. En tant que scientifiques, on ne saurait en disconvenir : ils contribuent à l'établissement de preuves empiriques. À défaut, nous resterions démunis. Comment procéder avec rigueur sans eux? Toutefois, s'ils disent beaucoup, ils ne sont pas tout : la leçon que l'on en tire dépend des interprétations que l'on en fait, et celles-ci se discutent. Le bilan des jeux Olympiques de Paris en offre une excellente illustration. À première vue, le classement des pays en considérant le décompte des médailles d'or fournit un bon indicateur. La Chine et les États-Unis se retrouvent en tête *ex-aequo*, avec 40 titres, suivis par le Japon (20), l'Australie (18) puis la France (16), et ensuite les Pays-Bas (15), le Royaume-Uni (14), la Corée du Sud (13), l'Italie et l'Allemagne *ex-aequo* (12), etc. Mais, si l'on considère le nombre total de médailles, les États-Unis surpassent très largement la Chine, avec 126 médailles contre 91, puis viennent le Royaume-Uni (65), la France (64), l'Australie (53), le Japon (45), l'Italie (40), les Pays-Bas (34), l'Allemagne (33), la Corée du Sud (32), etc. On en conclura que les États-Unis dominent sans partage, même s'ils sont en passe d'être rattrapés par la Chine. Quant à l'Union européenne envisagée comme un tout, en additionnant les récompenses de tous ses sportifs, elle peut se prévaloir de 97 titres en or et de 309 médailles, ce qui surpasse très largement les États-Unis et la Chine. Toutefois, si l'on rapporte ces distinctions à la population, le classement de ces dix pays s'inverse : pour l'or, les Pays-Bas deviennent les champions suivis de l'Australie et de la France, tandis que les deux derniers sont la Chine et les États-Unis, et pour l'ensemble des médailles, on trouve l'Australie en tête suivie des Pays-Bas, du Royaume-Uni et de la France, avec toujours la Chine en dernier, précédée du Japon. Bref, les chiffres parlent, mais ce qu'ils disent est sujet à disputes. Quant à ce qui a de la dignité, ce n'est pas quantifiable et n'a pas de prix, si bien que les chiffres n'en disent rien. Or, c'est peut-être ça que nous ont apporté ces JO…■

BRUNO LÉVY



L'ŒIL DE LASCAR

Ce devait être huit jours, ce sera huit mois. Les astronautes Butch Wilmore, 61 ans, et Suni Williams, 59 ans, ont décollé le 5 juin, sont arrivés dans la Station spatiale internationale (ISS) le 6, et devaient y passer une semaine avant de revenir sur la planète Bleue. Mais en raison de pannes sur leur vaisseau Starliner, conçu par Boeing, le retour du tandem a sans arrêt été ajourné. Finalement, la Nasa a décidé qu'ils rentreraient en février 2025 sur un vol SpaceX. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ANTHROPOLOGIE

Quand nos ancêtres ont-ils commencé à se vêtir ?

Ir Eddy B.

Si les humains ont sans doute commencé à se couvrir lorsqu'ils ont perdu leurs poils, il y a entre 3 et 1,2 million d'années, difficile de préciser quand le pli a été pris ou quelles étaient leurs habitudes vestimentaires, fourrures et tissus se dégradant avant de fossiliser. En remontant le rythme de mutations ADN de *Pediculus humanus capitis* et *Pediculus humanus corporis*, des poux vivant sur nos cheveux et nos habits, des chercheurs ont estimé que ces parasites s'étaient différenciés il y a 170 000 à 83 000 ans. Preuve que la nudité n'était déjà plus alors qu'un lointain souvenir. Par ailleurs, des traces de racloir laissées sur des ossements d'animaux montrent que Neandertal récupérait déjà peaux et fourrures sur ses proies. ■ **L. L.**

PERCEPTION

Pourquoi est-on toujours dans la file qui n'avance pas ?

Éric Q.

Dans les embouteillages, malgré l'impression d'être sur la voie qui avance le moins vite, aucune file n'avance plus vite qu'une autre. Elles vont toutes progressivement au même rythme, selon une étude publiée dans *Nature* en 1999.
À certains moments, une file accélère pendant qu'une autre ralentit. Néanmoins, un conducteur voit « longtemps » une voiture qui l'a doublé et brièvement celle qu'il dépasse. Doubler les voitures donnerait ainsi un sentiment de satisfaction mais n'améliore pas la situation. ■ **Coralie Lemke**

IMAGEBROKER/ANDIA.FR

Les bandes de couleur du deuxième arc apparaissent toujours dans l'ordre inverse de celles du premier (vallée de Virgental, en Autriche).

OPTIQUE

Comment se forme un double arc-en-ciel ?

Brigitte A.

Pluie et soleil sont propices à l'apparition d'un arc-en-ciel, et pour cause : les gouttes de pluie agissent comme un miroir qui vient réfléchir et dévier les rayons lumineux. Un phénomène de réfraction donne naissance à ces bandes colorées. On retrouve de manière plus ou moins visible les couleurs du spectre de la lumière blanche qui va du rouge à l'extérieur au violet à l'intérieur. Mais il peut arriver que l'on observe l'apparition d'un deuxième arc, dont les couleurs sont inversées par rapport au premier. Car cet arc secondaire est provoqué par une double réflexion de la lumière du soleil à l'intérieur des gouttes de pluie. Il apparaît derrière le premier arc, sous un angle de 50 à 53°, contre 40 à 42° pour le premier. Ce deuxième arc est moins visible car la double réflexion donne des couleurs moins vives. En revanche, il est beaucoup plus grand, quasiment deux fois plus que le premier, si bien qu'il peut être partiellement voire totalement en dehors du champ de vision de l'observateur. Pour pouvoir l'admirer, il faut que certaines conditions météorologiques soient réunies : en particulier pas de brume, de poussières ou d'autres particules qui peuvent disperser la lumière et le rendre moins visible. À l'inverse, un ciel plus sombre, souvent en fin de journée ou tôt le matin, peut améliorer le contraste. ■ **Lise Loumé**

LE CIEL D'OCTOBRE

PAR JOHAN KIEKEN

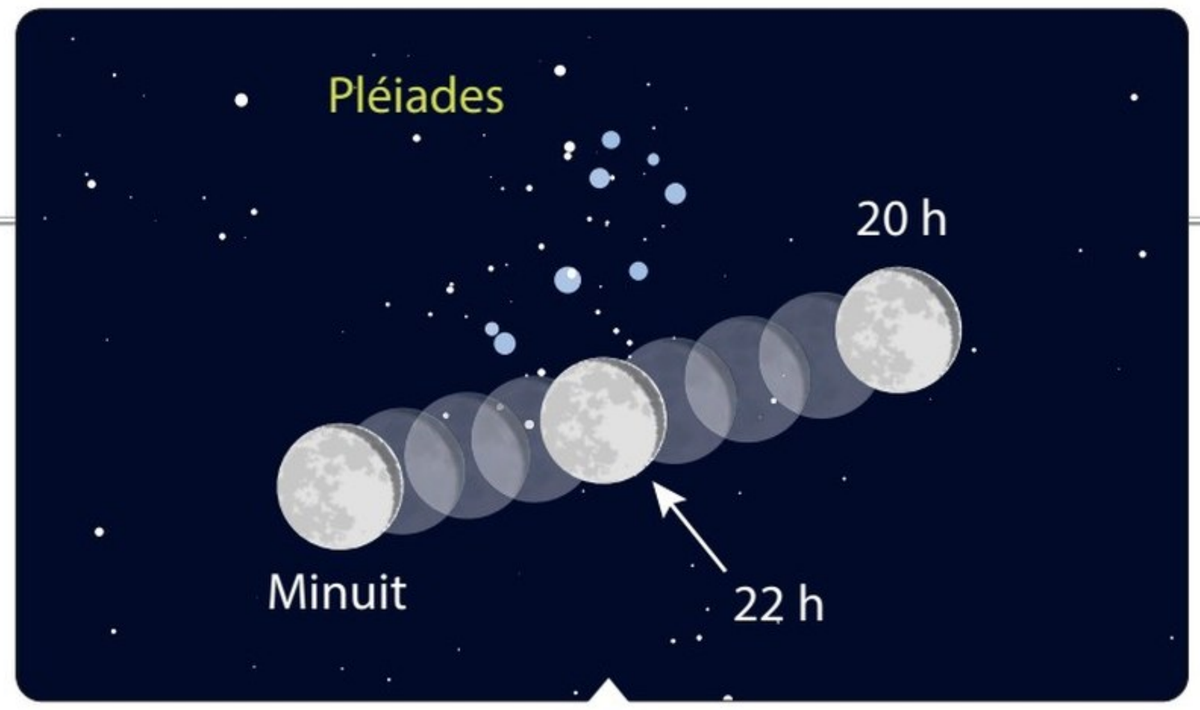
Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète est trop basse dans les lueurs du couchant pour être observable ce mois.

VÉNUS Les conditions d'observation de l'étoile du Berger s'améliorent légèrement au fil des jours, mais elle demeure basse vers le couchant en soirée. Elle passe sous l'horizon 1h 40min après le Soleil en fin de mois.

MARS La planète Rouge se lève vers minuit. On la trouve vers le sud au moment des premières lumières de l'aube. Elle rivalise désormais d'éclat avec les étoiles les plus lumineuses. Mars quitte la belle constellation des Gémeaux le 29 pour celle, plus pâle, du Cancer.

JUPITER La plus grande des planètes se dévoile en soirée vers l'est. La fin de nuit est idéale pour l'observer



La position de la Lune est donnée le 19, de 20 h (elle vient alors à peine de se lever vers le nord-est) à minuit, toutes les 30 minutes.

La Lune flirte avec les Pléiades

LE SOIR DU 19, la Lune passera très près de l'amas d'étoiles des Pléiades dans la constellation du Taureau. Cet amas splendide, proche de l'écliptique, reçoit régulièrement la visite des corps du Système solaire. Toutefois, notre satellite sera alors proche de la plénitude et sa lumière sera malheureusement bien gênante.

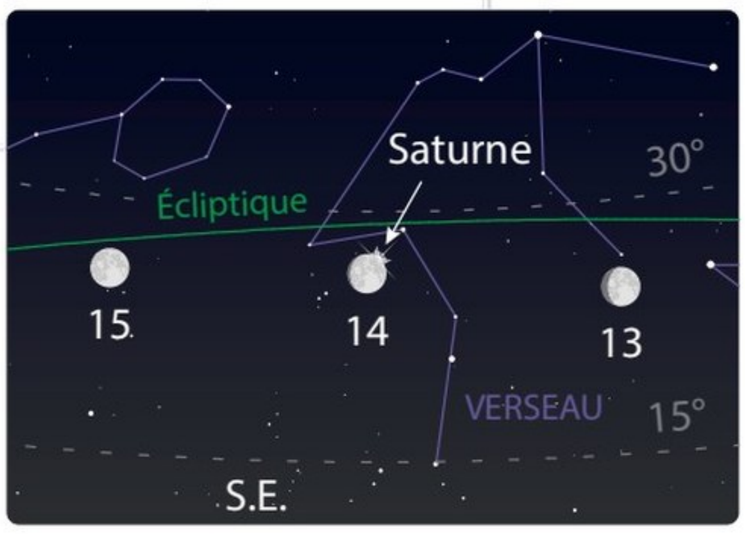
Notre conseil Nous vous invitons à suivre le rapprochement aux jumelles sur quelques heures. Cela vous permettra de mettre en évidence le mouvement propre de la Lune.

car elle est alors très haute au cœur de constellations composées d'étoiles brillantes qu'elle domine pourtant nettement en luminosité.

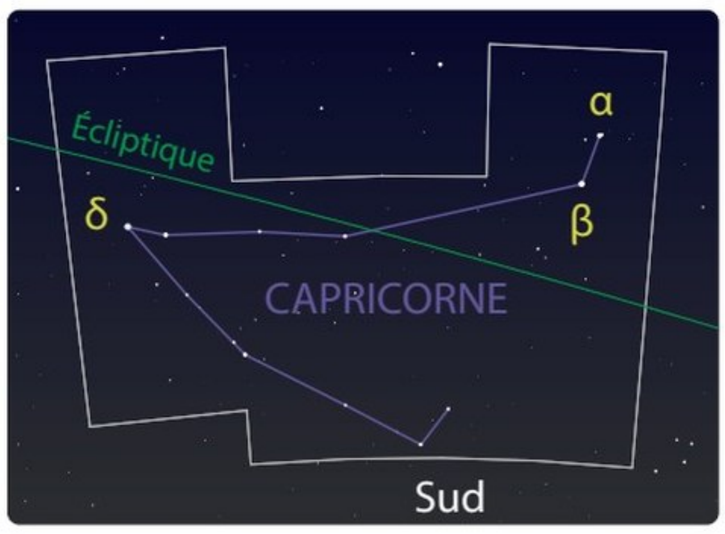
SATURNE Un mois après son passage à l'opposition, la planète aux anneaux est toujours dans de très bonnes conditions d'observation. Visible dès la tombée de l'obscurité, elle reste observable une grande partie de la nuit.

L'appli du mois

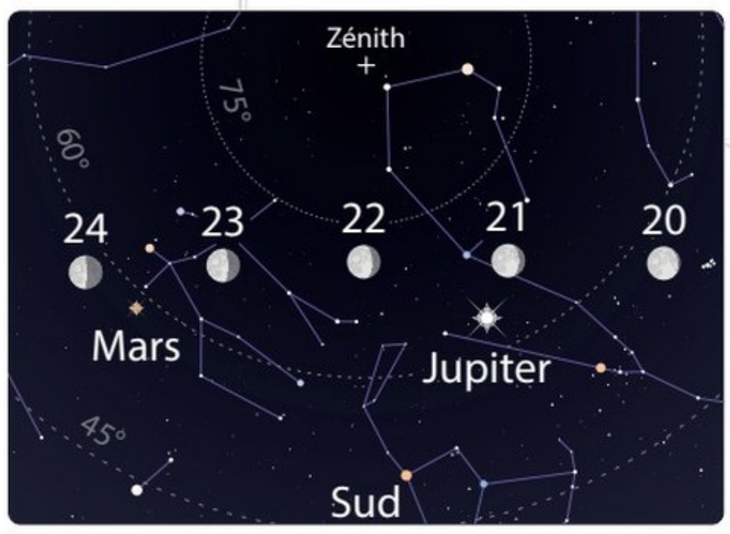
THE SUN NOW – NASA SDO est une application gratuite en anglais pour Android. Elle propose d'admirer en temps réel les images du Soleil transmises par le télescope spatial Solar Dynamics Observatory à de nombreuses longueurs d'onde, de connaître l'intensité du champ magnétique de notre étoile et du vent solaire, et de parcourir l'historique de ses observations depuis 2010.



LE SOIR DU 14, ENTRE LA PLANÈTE SATURNE ET LA LUNE PRESQUE PLEINE s'effectuera un rapprochement serré. Moins de 1° séparera les deux astres 2 h après le coucher du Soleil.



VERS 21 H, LE CAPRICORNE CULMINE AU SUD à une bonne vingtaine de degrés de hauteur. Bien qu'assez terne, cette constellation du zodiaque a une forme reconnaissable entre toutes.



DU 21 AU 24, LA LUNE EN PHASE GIBBEUSE DÉCROISSANTE rend visite aux planètes Jupiter et Mars. Nous sommes ici vers 6 h du matin et la scène prend place haut dans le ciel.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel d'octobre

JEUX

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

Sept hommes et un bateau

Sur le bord d'une rivière se trouvent sept hommes et un petit bateau ne pouvant embarquer qu'un homme à la fois et rien d'autre. Le bateau peut néanmoins accueillir un ou deux enfants, dont il s'en trouve deux sur le même bord que les hommes, chacun pouvant gouverner seul le bateau.

Comment les 7 hommes peuvent-ils traverser ?

Magie arithmétique

Complétez ce carré magique particulier pour qu'il contienne tous les nombres de 6 à 30 et que chaque ligne, chaque colonne et chacune des diagonales totalisent 90.

30		18			90
13	7	26		19	90
		14			90
			16		90
17	11		29	23	90
90	90	90	90	90	90

Chasse aux signes

Comment peut-on réaliser cette égalité en intercalant entre les chiffres les signes +, -, x, et parenthèses ?

1 2 3 4 5 6 7 8 9

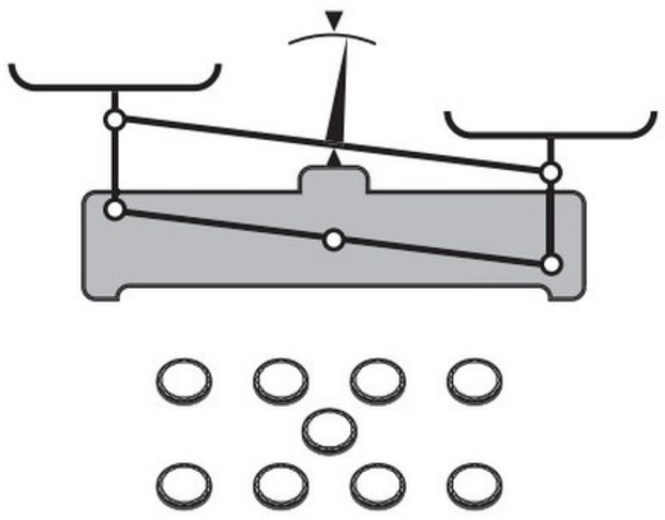
=

30

Les euros d'argent

À la mise en circulation des pièces de 10 euros en argent, des faussaires se sont empressés d'en fabriquer des fausses dans un métal plus vulgaire, plus léger que l'argent.

Devant 9 pièces dont une est fausse et avec seulement une balance de Roberval, un caissier peut-il déterminer la fausse en deux pesées ?



Pavage sauvage

Neuf carrés de 2 sur 2 ont été posés sur un grand carré de 4 sur 4. Seul le dernier posé est entièrement découvert, les huit autres étant partiellement cachés par ceux posés ensuite. Au vu des parties visibles, saurez-vous déterminer dans quel ordre ils ont été posés ?

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir » n° 931, septembre 2024

Chasse aux signes

11 + 7 - 8 = 10
10 + 7 + 8 = 25
13 + 9 + 9 = 31
11 - 10 + 13 = 14
7 - 7 + 9 = 9
8 + 8 + 9 = 25

Particularités secrètes

50 : seul divisible par 5
50 : seul divisible par 10
50 : seul n'étant pas divisible par 3
9 : seul carré
27 : seul cube (3^3)
96 : seul multiple de 12
14 : seul multiple de 7

Logique d'héritage

Belle a trois enfants, Anastasie en a deux et Céline un. Il y a 5 propositions que pour plus de facilité on nommera 1, 2, 3, 4, 5. D'après 2, Belle a trois enfants, Marie et deux fils (3) puisqu'elle a la famille la plus nombreuse et que Laure ne peut être la sœur de Marie (5). Anastasie n'ayant pas de fille (2), Laure ne peut qu'être la fille de Céline qui n'a donc qu'un enfant (5). Il reste deux garçons qui sont donc les enfants d'Anastasie.

Carré magique séquentiel

25	11	9	19	18	82
22	7	24	12	16	81
10	17	27	23	13	90
21	20	15	6	26	88
8	28	5	29	14	84
85	86	83	80	89	87	79

Combien de 0707 ?

0707 se lit de 48 manières :

Le 0 central est lié à quatre 7, chacun lié à quatre 0, soit un total de 16 possibilités.

Chaque autre 0 est lié à deux 7, chacun lié à deux 0, liés l'un à un autre 7, l'autre à trois 7. Cela donne 4 x 2 x (1 + 3) soit 32 possibilités.

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin

L'OR

Succombez

À LA GOURMANDISE DE NOS CAFÉS AROMATISÉS

POUR EN SAVOIR PLUS SUR LA GAMME

ou lorespresso.fr

L'OR SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 79 BOULEVARD SAINT GERMAIN – 75006 PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157, 70 EUROS.

Crédit photo : Getty Images/andresr.

Nos experts sont à vos côtés pour bien gérer vos placements

Chez Allianz, 1 100 conseillers experts en gestion de patrimoine sont à vos côtés partout en France pour vous accompagner et vous aider à préparer votre futur avec des solutions épargne, retraite et transmission adaptées.

Pour plus d'informations et prendre rendez-vous avec le conseiller le plus proche de chez vous, rendez-vous sur allianz.fr ou flashez ce QR Code.

Contacter un conseiller

Avec vous de A à Z

Allianz Vie - Entreprise régie par le Code des assurances - S.A. au capital de 681 879 255 € - 340 234 962 R.C.S. Nanterre.
Siège social : 1, cours Michelet - CS 30051 - 92076 Paris La Défense Cedex. Document à caractère publicitaire.